

AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE MANIPULACIÓN TIPO PICK AND
PLACE CON 3 GRADOS DE LIBERTAD

FELIPE MOSQUERA MORALES
CARLOS ANDRÉS CARDONA HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2015

AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE MANIPULACIÓN TIPO PICK AND
PLACE CON 3 GRADOS DE LIBERTAD

FELIPE MOSQUERA MORALES
CARLOS ANDRÉS CARDONA HERNÁNDEZ

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.

Director
M.SC. FRANCISCO JAVIER HENAO CASTAÑEDA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2015

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Pereira, ____ de Marzo de 2015

AGRADECIMIENTOS

Agradecerle siempre al poseedor y dueño de la vida, al que anima y guía en el camino, a DIOS.

A mis padres, abuelos, compañeros y docentes, quienes me apoyaron, animaron y aportaron en este hermoso proyecto de ser profesional; a mi director por su paciencia y dedicación, a los ingenieros Marlon Herrera y Mauricio Monroy por sus notables contribuciones a la realización de este trabajo.

Felipe Mosquera Morales

Ante todo a DIOS, a mi familia, compañeros y docentes.

Carlos Andrés Cardona

CONTENIDO	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GENERAL	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4. MARCO DE REFERENCIA	18
4.1 AUTOMATIZACIÓN	18
4.1.1 DEFINICIÓN DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL	18
4.2 SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE CONTROL	19
4.3 ROBÓTICA	21
4.3.1 HISTORIA DE LA ROBÓTICA	22
4.3.2 DESCRIPCIÓN DE UN ROBOT INDUSTRIAL	23
4.3.3 APLICACIONES DE UN ROBOT INDUSTRIAL	23
4.4 NEUMÁTICA	25
4.4.1 ELECTRONEUMÁTICA	26

4.5 ELECTRÓNICA	26
4.5.1 TARJETA ELECTRÓNICA ARDUINO	27
4.6 SERVOMOTORES	27
5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MANIPULADOR	29
5.1 TIPO DE MANIPULADOR CONSTRUIDO	29
5.2 SELECCIÓN DE ELEMENTOS NEUMÁTICOS	29
5.2.1 ACTUADORES NEUMÁTICOS	30
5.2.2 ELECTROVÁLVULAS	30
5.2.3 EYECTOR DE VACÍO	32
5.3 SELECCIÓN DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS	33
5.3.1 SENSORES	33
5.3.2 TARJETAS DE CONTROL	34
5.3.3 SERVOMOTOR RX-24F	36
5.4 MONTAJE DEL SISTEMA DE CONTROL	37
5.5 CIRCUITO NEUMÁTICO DEL MANIPULADOR	39
5.6 DISEÑO EN CAD DE ELEMENTOS MECÁNICOS	39
5.7 CONSTRUCCIÓN DEL MANIPULADOR	40
5.7.1 VARIACIONES EN LA CONSTRUCCIÓN DEL MANIPULADOR	42

6. CINEMÁTICA Y MODELOS MATEMÁTICOS DEL MANIPULADOR	48
6.1 VOLUMEN DE TRABAJO	48
6.2 CINEMÁTICA DIRECTA	49
6.2.1 REPRESENTACIÓN DE DENAVIT-HATENBERG	55
6.2.2 COMPROBACIÓN GRÁFICA DE LA CINEMÁTICA DIRECTA	58
6.3 PROBLEMA CINEMÁTICO INVERSO	59
6.3.1 COMPROBACIÓN GRÁFICA AL PROBLEMA CINEMÁTICO INVERSO	62
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
7.1 SECUENCIAS DE PROGRAMACIÓN	63
7.1.1 SECUENCIA 1	65
7.1.2 SECUENCIA 2	66
7.1.3 SECUENCIA 3	67
7.2 ANÁLISIS DEL SERVOMOTOR	68
7.2.1 PRUEBA CON INTERVALOS DE 15 ° INICIANDO EN EL PUNTO 0 °	68
7.2.2 PRUEBA CON INTERVALOS DE 60 ° INICIANDO EN EL PUNTO 0 °	69
7.2.3 PRUEBA CON INTERVALOS DE 30° INICIANDO EN EL PUNTO 0°	70
7.2.4 PRUEBA CON CON POSICIÓN DE INICIO ALEATORIA	71
7.3 COMPROBACIÓN FÍSICA DE LA CINEMÁTICA DIRECTA	73

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
8.1 CONCLUSIONES	75
8.2 RECOMENDACIONES	75
9. BIBLIOGRAFÍA	77

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquematización de la automatización industrial	19
Figura 2. Regulador de flotador para nivel de agua.	20
Figura 3. Estructura física del robot industrial.	23
Figura 4. Categorías de robots.	24
Figura 5. Preparación del aire.	26
Figura 6. Esquema básico de un manipulador RPP.	29
Figura 7. Actuador neumático SE 32x100.	30
Figura 8. Curvas de presión y caudal para el eyector.	33
Figura 9. Sensor Airtac CS-1E.	33
Figura 10. Tarjeta USB2Dymanixel.	35
Figura 11. Tarjeta Arduino Mega 2560.	36
Figura12. Servomotor RX24F Dynamixel.	37
Figura 13. Caja de control.	37
Figura 14. Vista interior caja de control.	38
Figura 15. Esquema electrónico de la tarjeta amplificadora.	38
Figura 16. Circuito neumático del manipulador.	39
Figura 17. Diseño inicial del manipulador pick and place con 3 GDL.	40
Figura 18. Alojamiento del actuador neumático horizontal.	41
Figura 19. Eje del servomotor.	42
Figura 20. Base para el soporte del servomotor.	42
Figura 21. Acople para actuadores neumáticos de horizontal a vertical marca Airtac, referencia F-SI32-FA.	42

Figura 22. Soporte circular.....	44
Figura 23. Disco circular para guía del movimiento rotacional.....	44
Figura 24. Soporte servomotor.	45
Figura 25. Guías lineales.	45
Figura 26. Placa soporte de guías lineales.	45
Figura 27. Abrazadera regulable para actuador vertical.	46
Figura 28. Sistema anti giro vástago actuador vertical.	46
Figura 29. Ensamble total manipulador pick and place con 3 GDL.....	47
Figura 30. Volumen de trabajo.....	49
Figura 31. Sistema de coordenadas de referencia ligado al cuerpo..	50
Figura 32. Establecimiento de coordenadas articulares para un robot cilíndrico (RPP).	57
Figura 33. Representación gráfica del manipulador RPP con 3GDL en Hemero toolbox.	58
Figura 34. Relaciones trigonométricas para la cinemática inversa del manipulador..	61
Figura 35. Posibles posiciones del efector final en el plano XY.	62
Figura 36. Grafcet para la secuencia 1.....	65
Figura 37. Grafcet para la secuencia 2.	66
Figura 38. Grafcet para la secuencia 3.	67
Figura 39. Gráfica prueba intervalos de 15 ° iniciando en el punto 0 °.	69
Figura 40. Gráfica prueba a 60°.....	70
Figura 41. Gráfica prueba a 30° iniciando en 0°..	71

Figura 42. Gráfica Prueba intervalos de 30° en una posición de inicio aleatoria.. 72

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Especificaciones de actuadores neumáticos SE -32	30
Cuadro 2. Características de la electroválvula Festo MFH-5-1/8.....	31
Cuadro 3. Característica de la electroválvula Festo MFH-3-M5.....	32
Cuadro 4. Especificaciones del sensor Airtac CS-1E.	34
Cuadro 5. Características de la tarjeta Arduino Mega 2560	35
Cuadro 6. Especificaciones del servomotor RX24F Dynamixel.	36
Cuadro 7. Parámetros Denavit-Hartenberg	56
Cuadro 8. Resultados prueba intervalos de 15° iniciando en el punto 0 °	69
Cuadro 9. Resultados de la prueba con intervalos de 60° iniciando en el punto 0°.	70
Cuadro 10. Resultados de la prueba 30 ° y posición inicial 0 °	71
Cuadro 11. Resultados de la prueba con intervalos de 30° en una posición de inicio aleatoria.	72
Cuadro 12. Comprobación física de la cinemática 1.....	73
Cuadro 13. Comprobación física de la cinemática 2.....	74
Cuadro 14. Comprobación física de la cinemática 3.....	74

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Acciones y receptividades del manipulador.	64
--	----

INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de la robótica, los dispositivos pick and place (sistemas de colocación y agarre) han sido foco de múltiples investigaciones, debido a su gran utilidad en funciones como manipulación de residuos nocivos para la salud, en celdas de manufactura flexible, en aplicaciones aeroespaciales, supliendo la mano de obra humana en actividades que requieren precisión, que provocarían posiciones incómodas o son de alta repetitividad.

Debido a que el ingeniero mecánico actual, debe desarrollar competencias en campos como la programación de lenguaje de máquina, la interacción de sistemas mecánicos con eléctricos y electrónicos, y especialmente, automatización; se buscó construir un manipulador robótico programable, un trabajo sin antecedentes en la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, pues, es el primer manipulador construido allí por estudiantes de pregrado.

Para la realización de este proyecto se aprovecharon herramientas como la neumática, los servomecanismos, y las plataformas libres como Arduino, basada en *processing* (lenguaje de programación, entorno de desarrollo, y la comunidad en línea), para ejecutar el sistema de control.

Inicialmente se definieron parámetros claves para el desarrollo de un manipulador como su tipo, la configuración geométrica, sus elementos activos de ejecución (actuadores), elementos de control y un modelo mecánico que soportara los componentes anteriormente mencionados.

Posterior al diseño mecánico del manipulador, se procedió a su construcción, encontrando ventajas y limitaciones en los montajes, realizando cambios y ajustes para lograr un dispositivo de funcionamiento mecánico óptimo.

Seguidamente para tener un concepto más amplio sobre el funcionamiento del manipulador se desarrollaron los modelos matemáticos relevantes, como el modelo cinemático directo, el inverso y su volumen de trabajo, para observar la capacidad y limitaciones del manipulador en un espacio físico de trabajo.

Para culminar se realizaron pruebas al servomecanismo, exhibiendo las cualidades de su tecnología, se comprobó físicamente su modelo cinemático directo para certificar el buen desarrollo de los modelos matemáticos, y se programaron secuencias de trabajo para el manipulador aprovechando las ventajas de los lenguajes de programación de plataformas libres, simulando posibles funcionalidades en la industria.

Se busca promover la robótica como un tópico de interés, que puede favorecer desde la comunidad académica hasta los sectores empresariales de la región y el país, pues, el propósito de la automatización y la robótica es promover procesos productivos más eficientes y rápidos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La automatización juega un rol fundamental en los procesos productivos industriales contemporáneos, bien sea, haciéndolos más rápidos y eficientes o evitando que el personal humano se exponga a labores en deterioro de su salud, siendo la robótica una de las ramas más notables de la automatización.

A pesar de que la robótica es una rama de estudio de la ingeniería que data de décadas, en Colombia, sus avances investigativos son pocos, el objetivo es mostrar cómo se puede desarrollar e implementar este tipo de tecnología, entonces, la finalidad del proyecto no es más, que ahondar en este importante campo de la ciencia y sembrar inquietud para que más personas de la comunidad académica se acerquen a ella, y no quede rezagada a algo lejano, algo a lo que no se tiene acceso.

Los manipuladores robóticos cuentan con gran cantidad de categorías, dependiendo de muchos factores como por ejemplo su configuración geométrica o el tipo de sistema de control. Existen unas categorías de manipuladores industrialmente comunes, por ejemplo los robots Scara, Puma o de Standford, soportados con mucha información bibliográfica, en la que se puede encontrar sus modelos matemáticos e inclusive estrategias de control recomendadas. Sin embargo, este proyecto planteó definir un modelo de manipulador propio, iniciando en la planeación de su tipo y configuración, realizando su análisis matemático, ejecutando su construcción mecánica y el desarrollo de sus secuencias de trabajo aprovechando las plataformas de lenguaje libres para implementar su sistema de control de una forma didáctica.

2. JUSTIFICACIÓN

En la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, especialmente en el laboratorio de Sistemas Dinámicos se han venido desarrollando proyectos en torno a la automatización, fortaleciendo los conocimientos en cursos como Instrumentación y Control y Regulación y Automatismo.

Se abordó una rama de la automatización muy relevante, la robótica, en el proyecto se diseñó, construyó y se realizó el análisis funcional de un manipulador cilíndrico tipo pick and place. El manipulador cuenta en total con tres grados de libertad, un grado de libertad rotacional y dos prismáticos, permitiendo simular diferentes tareas en procesos industriales, que a su vez, puede ser programado para una variedad de tareas dentro de su espacio de trabajo.

El proyecto es pionero dentro de la facultad de Ingeniería Mecánica, es decir, es el primer manipulador construido por estudiantes de pregrado, y puede aportar posteriormente al desarrollo de más proyectos, prácticas estudiantiles o demostraciones académicas, en torno a la robótica, alentando a los estudiantes y docentes a realizar investigación alrededor de este tópico, fortaleciendo competencias y ampliando conceptos, proveyéndolos de un recurso tangible y presente destinado para tales fines.

Al mostrar lo flexibles y versátiles que son los manipuladores, también puede servir como referencia para que las industrias nacionales se interesen en este tipo de dispositivos, para que intervengan en sus procesos de producción haciéndolos mas eficientes.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Automatizar un manipulador pick and place con 3 grados de libertad integrando diferentes elementos de la automatización.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.2.1 Identificar las variables físicas del manipulador para hacer óptima su construcción.

3.2.2 Definir las especificaciones del manipulador.

3.2.3 Calcular el espacio de trabajo del sistema pick and place y su cinemática.

3.2.4 Seleccionar la simulación adecuada del manipulador dentro de un proceso de producción.

4. MARCO DE REFERENCIA

A continuación se presentan conceptos básicos sobre automatización y robótica, especialmente sobre los elementos utilizados para la realización de este trabajo, haciendo un recuento conceptual e histórico.

4.1 AUTOMATIZACIÓN

El sustituir la intervención humana directa por fuentes alternativas de energía controladas para la realización del trabajo fue un paso fundamental en la evolución del hombre, permitiendo así realizar tareas de forma más eficaz. El uso de poleas para levantar grandes cargas, la utilización del vapor como fuerza motriz, los mecanismos de relojería, el aprovechamiento de los caudales de agua o las corrientes de viento, son algunos ejemplos del inicio de la automatización en la historia humana.

La automatización ha sido crucial en el crecimiento y desarrollo de la industria, pues las necesidades de producir a gran escala y de forma eficiente, para sostenerse en el mercado globalizado, han llevado al hombre a hacer ahínco en cómo mejorar los sistemas de producción, producir en serie, de manera uniforme y aprovechando los recursos tecnológicos.

La automatización ha sido un recurso primordial en la vida del ser humano, pues esta permite realizar trabajos que estaban divididos en pequeñas tareas y unificarlos, logrando así obtener mejores resultados. La automatización ha sido utilizada en todos los sectores de la sociedad, desde la guerra hasta la producción de alimentos, haciendo más liviana la labor del hombre.

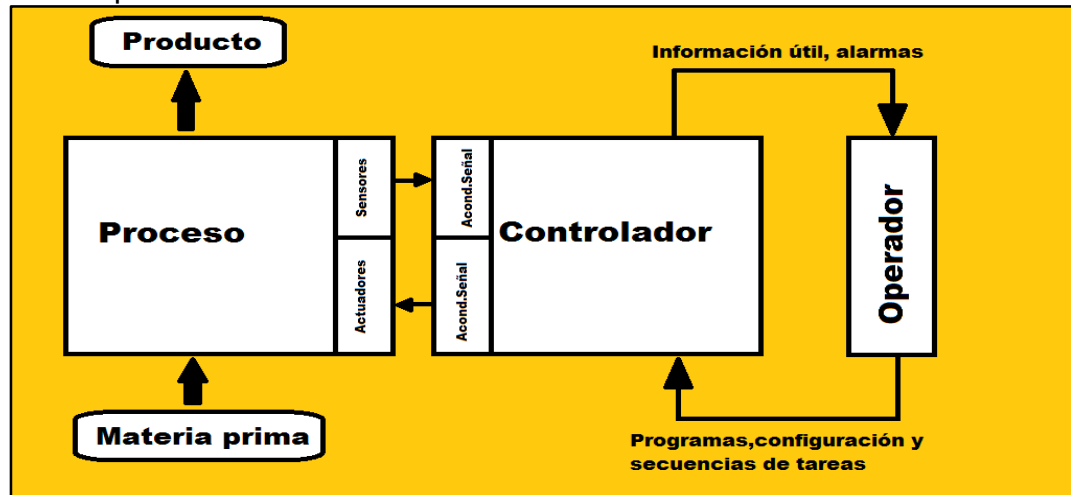
Dentro de los campos hoy día destacados en la automatización figura la robótica, pues esta es una forma de manufactura flexible, que puede reprogramarse por medios computacionales, realizar tareas repetitivas, de gran esfuerzo y precisión. También se utiliza en tareas que representan un riesgo para la vida humana, como lo son; el manejo de residuos tóxicos o radioactivos, el trabajo en espacios no adecuados, en sitios de difícil acceso para el ser humano o en posiciones incómodas, siendo también manipulado de forma tele-operada.

4.1.1 Definición de automatización industrial. Uso de sistemas o elementos computarizados para controlar maquinarias y/o procesos industriales

substituyendo a operadores humanos¹. Como esquema de un sistema de automatización industrial se muestra la figura 1.

En la automatización industrial se utilizan sistemas electromecánicos, sensores, transmisores de campo, sistemas de control y software para realizar monitoreo, control y supervisión de plantas o procesos industriales.

Figura 1. Esquematación de la automatización industrial



4.2 SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE CONTROL

“El uso de la retroalimentación, con el objeto de controlar un sistema, ha tenido una historia fascinante. Las primeras aplicaciones del control con retroalimentación se basan en los mecanismos regulados con flotador, desarrollados en Grecia en el periodo 0 a 300 A.C”². El regulador con flotador fue utilizado por Ktesibios en un reloj de agua. En el año 250 A.C Philón desarrolló una lámpara de aceite que sostenía el nivel de aceite por medio de un regulador con flotador, un siglo después de Cristo, Herón de Alejandría, publicó un libro en el cual mostraba varias formas de mecanismos de nivel mediante reguladores con flotador y lo tituló “pneumática”.

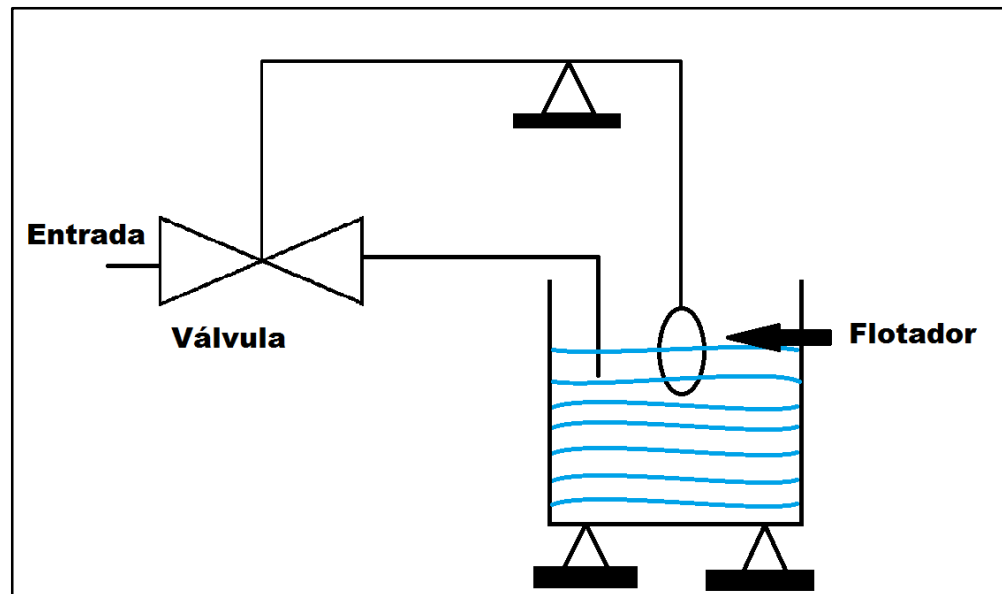
¹ **RUEDAS**, Carlos. Automatización industrial: Áreas de aplicación para ingeniería. Universidad Rafael Landívar. 2008. Agosto de 2013. Disponible en internet: <http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_10_MEC01.pdf>.

² **VALENCIA GALLÓN**, Jorge Hernán. Sistemas automáticos de control. Medellín-Colombia, serie NABLA-DELTA No.21, 1991.

El holandés Cornelis Drebbel (1572-1633), inventó el primer sistema con retroalimentación para regular temperatura, en el año 1681 Papin inventó el regulador de presión para calderas de vapor, este regulador fue un dispositivo de seguridad similar al empleado en las ollas a presión.

El primer sistema dado a conocer por la unión soviética en 1765 fue el regulador de nivel de agua tipo flotador, se dice, que fue inventado por I. pulzo-nov. Dicho sistema se ilustra en la figura 2.

Figura 2. Regulador de flotador para nivel de agua



Las teorías de control comenzaron a desarrollarse a partir del regulador centrífugo de James Watt, que controlaba la velocidad de una máquina de vapor en 1768. A mediados del siglo XIX no se tenía mayor conocimiento científico de los sistemas de control, todo se realizaba de manera empírica e instintiva, pero J.C Maxwell desarrolló un estudio matemático basado en ecuaciones diferenciales, haciendo el análisis de un regulador, y, considerando todo tipo de parámetros que intervenían en el sistema.

En el periodo comprendido entre 1932 y 1934 hombres como Nyquist y Hazen realizaron grandes aportes a los sistemas de control, como determinar la estabilidad de los sistemas de lazo cerrado y la introducción del término "servomecanismo" para designar los sistemas de control de posición.

Para la década de 1940 ya habían desarrollado diversos métodos analíticos y matemáticos para la observación y desarrollo de los sistemas de control, dando paso así a la era de la ingeniería de control. Con el advenimiento de la era aeroespacial, el hombre requirió más recursos en lo que compete a esta materia, bien fuese para direccionar dispositivos como cohetes, proyectiles o satélites. También con el surgimiento de las computadoras analógicas y digitales se pudieron obtener mejores resultados en los sistemas de control, mayor rapidez y eficacia.

Los sistemas de control permiten que haya un mejor desempeño en un determinado proceso, que haya una reducción de errores, teniendo en cuenta los múltiples factores que intervienen en este, pero, son a groso modo, mayormente empleados en los procesos industriales, donde se puede realizar control a sistemas eléctricos, mecánicos, neumáticos, hidráulicos etc.

Existe una clasificación para los sistemas de control, de lazo abierto y de lazo cerrado. El sistema de control de lazo cerrado maneja una señal de entrada y una de salida, donde la señal de salida no interviene nunca en la señal de entrada, es decir, no hay comparación entre las dos señales, mientras tanto, los sistemas de control de lazo cerrado entregan una señal de salida que a su vez retorna a la señal de entrada para ajustar así los parámetros deseados.

4.3 ROBÓTICA

La fascinación por simular de forma mecánica o artificial seres animados, más la progresiva necesidad de fuerza de trabajo, ha llevado la humanidad a buscar alternativas para sustituir el trabajo físico, o la potencia muscular, por máquinas o instrumentos con capacidad de procesar información, suplementar e incluso reemplazar el trabajo humano. Desde los autómatas franceses y suizos del siglo XVIII, que ya incorporaban complejas estrategias de control automáticas para su movimiento, hasta nuestros días, ha habido una concurrencia por parte de la ingeniería y la ciencia, para desarrollar dispositivos capaces de suplir necesidades de trabajo mostrando notorios avances e interés en el campo de la robótica.

La palabra robot proviene de la palabra checa “robota” que significa fuerza de trabajo o esclavo, y, fue tomada en 1921 de la obra teatral R.U.R (Rossum’s Universal Robots) del novelista y autor dramático checo Karel Capek, haciendo alusión a la dominación del hombre sobre la máquina. Se produce entonces una tendencia marcada hacia la realización de obras teatrales y proyectos cinematográficos en los cuales los autómatas robóticos eran la temática central, y, a su vez, una oleada científica impulsada por las necesidades de la economía y la

producción industrial, desarrollando así tecnologías e instrumentos que enriquecieron la ciencia denominada robótica³.

4.3.1 Historia de la robótica. “En la historia de la humanidad, varios siglos antes de Cristo, existen registros de máquinas automatizadas empleadas en las guerras, la agricultura, la construcción: catapultas, máquinas de fuego, órganos de viento, máquinas de vapor, etc.” Para el año 1206 D.C un prominente ingeniero proveniente de la Mesopotamia conocido como Al-Jazari construyó el primer robot humanoide, en 1532 en Estrasburgo se podía avistar sobre su catedral un gallo que agitaba las alas y cantaba, conocido como el gallo de Estrasburgo, y, en 1738 Jacques Vaucanson construyó un pato mecánico con movimientos simples. El reconocido y multifacético Leonardo da Vinci realizó notables contribuciones para la ingeniería de su época, en la ciudad de Florencia (Italia), tales como la construcción de puentes desarmables para cruzar ríos, puertas automáticas que ya no necesitaban intervención de fuerza humana por medio de poleas y sistemas de engranajes, sistemas de propulsión de viento para navegar ríos y mares, mecanismos para transportar agua, construyó el primer robot articulado utilizando la armadura de un caballero en 1495, pese a que esto solo se dio a conocer en 1950, después de haber sido encontrado en sus notas.

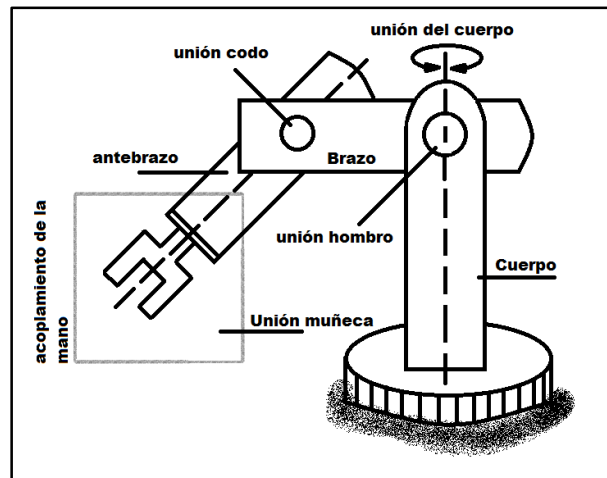
Para nuestra época, a partir de la inclusión de la palabra robot en 1921 por parte del checho Karel Capek en la obra *Russum's Universal*, se adelantaron numerosos estudios en la materia, el periodo más trascendental fue entre las décadas de 1940 y 1950. Para el año 1954 George Devol desarrolló el primer robot reprogramable, llamado UNIMATE, y que fue puesto en operación por parte de la empresa General Motors en 1961. En ese mismo año Victor Scheinman presenta el primer robot articulado de 6 ejes en la universidad de Stanford, conocido como el robot de Stanford. Dos años después *Fuji Yusoki Kogyo* desarrolló el primer robot para aplicaciones *palletizing*, cuyo nombre fue *Palletizer*. “En 1975, Victor Scheinman desarrolló el robot PUMA (*programable universal machine for assembly o programable universal manipulation arm*) de la compañía UNIMATION (inicialmente este robot fue desarrollado para *General Motors*). El modelo más popular fue el PUMA-650” [8]. El primer robot de transmisión directa se diseñó y construyó en 1981 por Haruhiko Asada en la *Universidad de Carnegie-Mellon*, Pittsburgh, Pennsylvania. Durante muchos años varias compañías como Westing-house electric Corporation, ABB, General Motors y KUKA Robotics entre otras han trabajado en numerosos proyectos de robótica. Por ejemplo; en el año 2000 Honda Motors Co. Ltda presentó el primer robot humanoide llamado ASIMO, con la capacidad de caminar e interactuar con personas. Ya para el año 2010 se

³ REYES CORTÉS, Fernando. Robótica, control de manipuladores. México D.F: alfaomega grupo editor S.A, 2011, p.15-53.

venían trabajando los robots de cuarta generación, robots inteligentes, con control en tiempo real y sensores sofisticados⁴.

4.3.2 Descripción de un robot industrial. Un robot industrial es un manipulador de usos múltiples, conectado con elementos rígidos que pueden ser prismáticos o de revolución, fijados a una base, bastidor o soporte, y, que al final de su cadena cinemática cuenta con actuador de sujeción, soporte o ejecución (como en el caso de los robots soldadores), causando así un movimiento relativo entre pieza y pieza⁵. El robot cuenta con un volumen de trabajo, es decir, puede describir trayectorias o posicionarse en cualquier ubicación que se encuentre dentro de esta esfera de influencia. Por lo general los brazos robóticos pueden realizar movimientos con tres grados de libertad variando el número de articulaciones que, a su vez, dependen del mecanismo de sujeción normalmente llamado muñeca⁶. Estos conceptos se ilustran en el robot de la figura 3.

Figura 3. Estructura física del robot industrial.



4.3.3 Aplicaciones de un robot industrial. Los robots son de mucha utilidad en la industria, sobre todo cuando se habla de labores repetitivas, de gran esfuerzo físico o peligro y que demandan alta precisión. Es por esto que son utilizados en tareas de fabricación y ensamblaje, como en montajes y transporte de piezas, pintura, soldadura, manejo de materiales peligrosos, exploraciones en sitios de

⁴ REYES CORTÉS, Fernando. Robótica, control de manipuladores. México D.F: alfaomega grupo editor S.A, 2011, p.15-53.

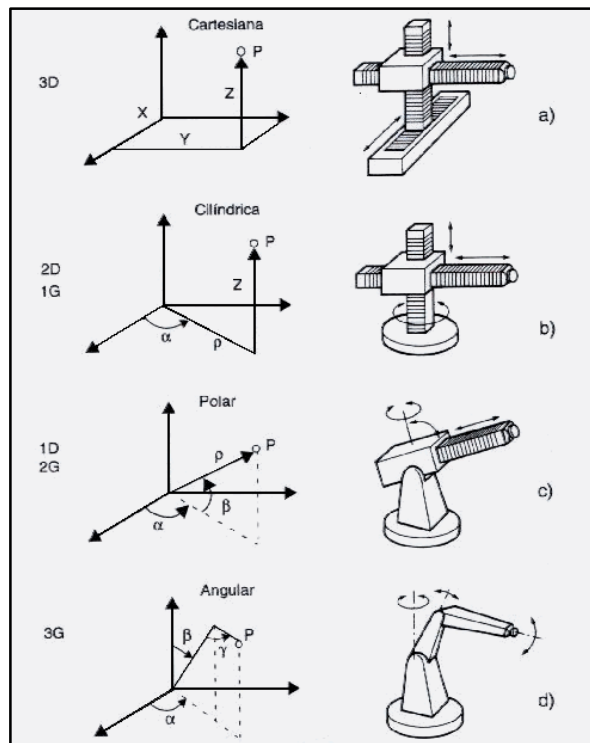
⁵ FU, K.S; GONZALEZ, R.C y LEE, C.S.G. Robotics: control, sensing, visión and intelligence. United States of America. Mc Graw Hill, 1987, p 13-75.

⁶ REYES CORTÉS, Fernando. Robótica, control de manipuladores. México D.F: alfaomega grupo editor S.A, 2011, p.15-53.

riesgo y en el estudio de brazos protésicos⁷. Los robots son frecuentemente utilizados en la industria automotriz, aeroespacial, militar, e incluso para realizar procedimientos médicos, además están clasificados en dos grandes categorías; móviles y fijos, aunque también, de acuerdo a su grado de autonomía, es decir, si son teleoperados, de funcionamiento repetitivo y autónomos o inteligentes.

Para el caso particular de los manipuladores industriales se tienen en cuenta categorías dependiendo de los movimientos básicos que realicen y su geometría con cuatro configuraciones básicas; cartesiana, cilíndrica, polar y angular⁸. Ver figura 4.

Figura 4. Categorías de robots



OLLERO BATURONE, Aníbal. Robótica: manipuladores y robots móviles. Barcelona. Marcombo S.A, 2001, p.19.

⁷ REYES CORTÉS, Fernando. Robótica, control de manipuladores. México D.F: alfaomega grupo editor S.A, 2011, p.15-53.

⁸ FU, K.S; GONZALEZ, R.C y LEE, C.S.G. Robotics: control, sensing, visión and intelligence. United States of America. Mc Graw Hill, 1987, p 13-75.

4.4 NEUMÁTICA

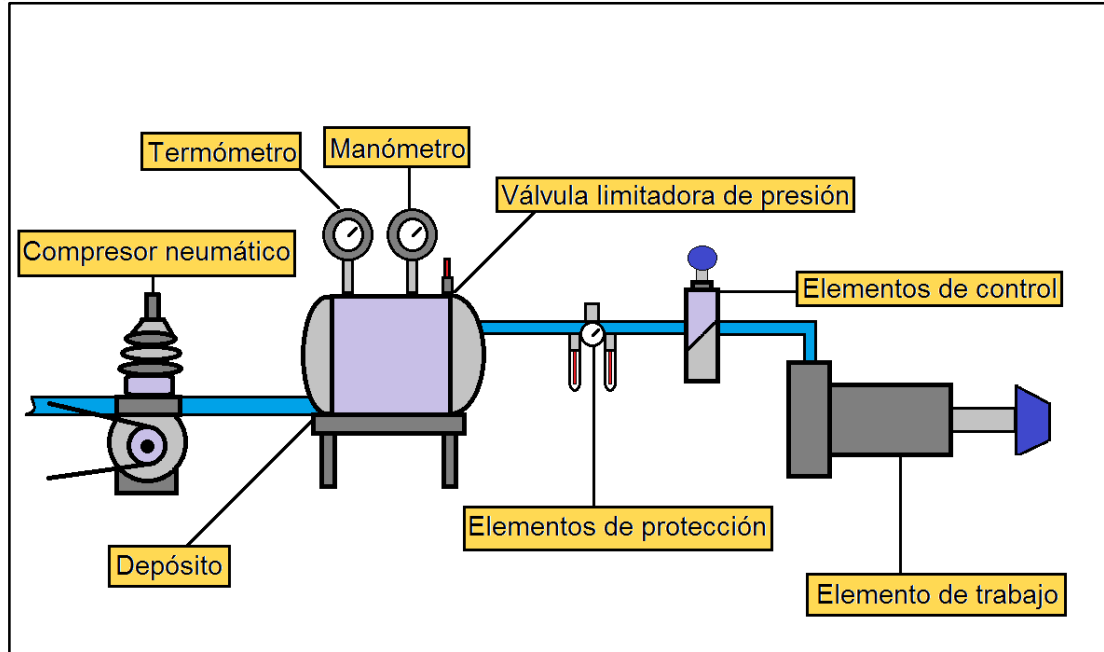
La palabra neumática proviene de la raíz griega “pneuma” que significa aire. Es la tecnología que se dedica al estudio del movimiento del aire, aprovechando sus características de gas ideal y como material elástico, esto implica que, al aplicársele una gran cantidad de energía en su etapa de compresión, este la retorne al descomprimirse. En sus comienzos el hombre utilizó el aire como fuerza motriz para la navegación, transporte de materia (correo), en molinos, y también para bombear agua. En 1868 George Westinghouse fabricó un freno de aire, revolucionando así el transporte ferroviario. Para la década de 1950 se comienza a desarrollar esta industria, paralelo al desarrollo de los sensores.

Gracias a los sistemas de aire comprimido se pueden aprovechar herramientas como motores neumáticos, prensas neumáticas, martillos neumáticos, sistemas de empaquetado, herramientas de impacto, robots industriales, vibradores y frenos neumáticos. Su uso es ilimitado, la facilidad de comprimir aire, transportarlo, el bajo costo que esto implica y la seguridad de los sistemas neumáticos los han convertido en un elemento fundamental en la industria, particularmente cuando se habla de automatización.

Los sistemas de aire comprimido constan básicamente de elementos activos llamados compresores y de varios elementos pasivos que son: tanques acumuladores que almacenan el fluido, filtros que eliminan las impurezas del aire (partículas, humedad etc.), lubricadores que inyectan pequeñas partículas de aceite en el sistema, evitando así el desgaste de piezas mecánicas, reguladores de presión que mantienen constante la presión en el sistema, silenciadores que reducen el ruido al expulsar aire a la atmósfera, elementos de transporte del fluido lo suficientemente resistentes para soportar la presión y llevar aire a los puntos deseados del circuito neumático, elementos de control y regulación como; válvulas que direccionan, cortan o permiten el paso del fluido y, elementos de trabajo como actuadores lineales o rotativos⁹, véase en la figura 5.

⁹ **CREUS SOLÉ**, Antonio. Neumática e hidráulica. Segunda edición. México D.F. Alfaomega grupo editor, 2011, p. 1-7.

Figura 5. Preparación del aire



4.4.1 Electroneumática. Los sistemas neumáticos se complementan con los eléctricos y electrónicos, permitiendo así dar un alto grado de tecnificación y multiplicidad en sus usos. Comúnmente se utilizan válvulas solenoides, señales de realimentación de interruptores magnéticos, interruptores y sensores eléctricos para finales de carrera. Para usos más eficientes se utilizan los PLC (programable logic controller) y microprocesadores, permitiendo así programar la lógica del funcionamiento de un conjunto neumático¹⁰.

4.5 ELECTRÓNICA

Es el estudio de sistemas que para su funcionamiento utilizan la conducción y control de flujo de electrones u otras partículas con carga eléctrica, diseño y construcción de circuitos electrónicos. Es fundamental en la resolución de problemas en campos como la ingeniería electrónica, electromecánica, la informática e implica el diseño de software para su control.

Los circuitos electrónicos son particularmente utilizados en el control, procesamiento, distribución de información, conversión y distribución de energía eléctrica, involucrando así la detección o creación de campos electromagnéticos y corrientes eléctricas.

¹⁰ CREUS SOLÉ, Antonio. Neumática e hidráulica. Segunda edición. México D.F: Alfaomega grupo editor, 2011, p. 1-7.

4.5.1 Tarjeta electrónica Arduino. “Arduino es una plataforma de electrónica abierta, para la creación de prototipos basada en software y hardware libre, flexible y fácil de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquier interesado en crear entornos u objetos interactivos.”¹¹

Arduino puede recopilar información de su entorno por medio de sus pines de entrada, dando la posibilidad de utilizar una amplia gama de sensores y, a su vez, controlando luces, motores y otros actuadores por medio de sus pines de salida. El microcontrolador de la placa Arduino se controla mediante el lenguaje de programación Arduino que está basado en *Wiring* y el entorno de desarrollo Arduino basado en *processing* (lenguaje de programación, entorno de desarrollo, y la comunidad en línea).

Las placas Arduino pueden ser fabricadas a mano o comprarse montadas de fábrica, es una plataforma libre, de fácil adaptación, muy versátil y flexible al interactuar con diversos tipos de software.

4.6 SERVOMOTORES

Los servomotores son dispositivos electromecánicos constituidos fundamentalmente por tres elementos: amplificador electrónico, motor eléctrico y sensor de posición. El sensor de posición se encarga de medir el desplazamiento articular (lineal o rotacional) y el amplificador electrónico o servo amplificador que se encarga de acondicionar al motor la impedancia y la señal de voltaje de baja potencia proveniente de una computadora o un sistema mínimo digital.

Los servomotores cuentan con tres modos de operación: posición, velocidad y par. El modo posición puede mover el motor a un punto o posición preestablecida llamado *set point*. Este modo no permite desplazar cargas o aplicar una fuerza determinada, dándose así el frecuente uso de reguladores como el proporcional derivativo (PD) o el integral proporcional derivativo (PID). En el modo velocidad se controla el movimiento del motor a una velocidad deseada, pero al igual que en el modo posición, no se puede ejercer fuerza, son llamados entonces, modos de arquitectura cerrada, debido a que no pueden programar otro tipo de controladores, lo cual restringe su uso en el campo de la robótica.

El modo par es el más empleado en robótica, considerado de arquitectura abierta, lo que permite evaluar experimentalmente las estrategias de control, interactuar

¹¹**Guía básica Arduino.** Tienda robótica.20 de enero de 2014. Disponible en internet < <http://tdrobotica.co/tutoriales/81-arduino-2/345-guia-arduino>>.

directamente con el sistema mecánico del robot, permitiendo así evaluar los efectos dinámicos del robot y por consiguiente; controlar posición, fuerza y desplazamiento articular.

El termino servomecanismo se utiliza cuando un servomotor es acondicionado mecánicamente a un péndulo o eslabón, es decir; el servomotor y el sistema mecánico acoplado.

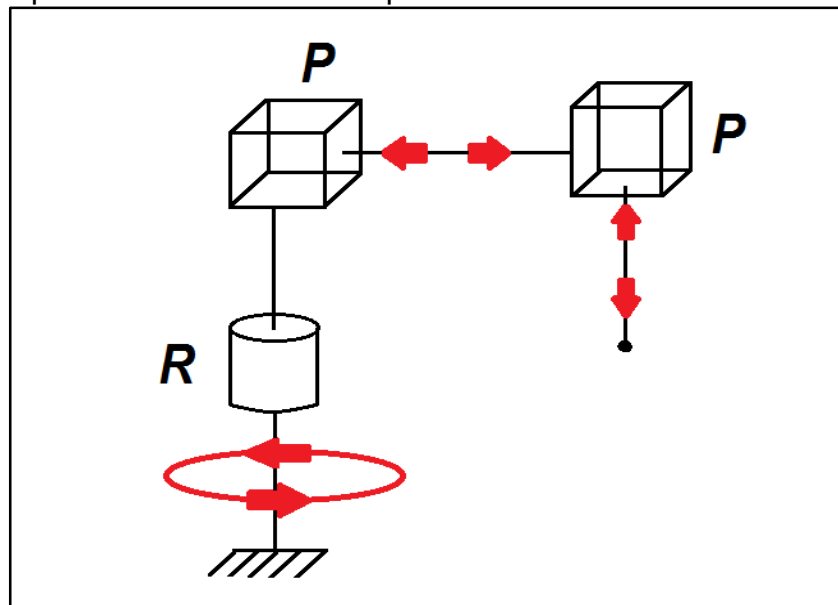
5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MANIPULADOR

El presente capítulo presenta cómo se realizó la selección del tipo de manipulador, su diseño mecánico, elección de actuadores, y elementos de control para llegar a su construcción final.

5.1 TIPO DE MANIPULADOR CONSTRUIDO

Se decidió construir un manipulador con coordenadas cilíndricas de tipo RPP con dos ejes lineales y uno rotacional. Para tal fin se utilizó un servomotor como elemento rotacional, dos actuadores neumáticos que realizan los movimientos lineales y, una ventosa neumática encargada de realizar la función de sujeción de pieza. La figura 6 muestra el esquema básico para el tipo de manipulador previamente descrito.

Figura 6. Esquema básico de un manipulador RPP



5.2 SELECCIÓN DE ELEMENTOS NEUMÁTICOS

De acuerdo con las consideraciones de tamaño y geometría, los elementos neumáticos seleccionados para el desarrollo del proyecto se presentan a continuación:

5.2.1 Actuadores neumáticos. Se utilizaron dos actuadores neumáticos marca Airtac, referencia SE-32x100, con las especificaciones mostradas en el cuadro 1. Este tipo de actuadores se aprecian en la figura 7.

Cuadro 1. Especificaciones de actuadores neumáticos SE -32

Tamaño de diámetro mm	32
Tipo de acción	Doble Efecto
Medio	Aire
Tipo de montaje	Básico
Presión de trabajo	0.1~1.0 Mpa(14~145 Psi)
Presión de prueba	1.5 Mpa (215 Psi)
Temperatura °C	-20 ~ 80
Rango de velocidad mm/s	30-800
Tipo de amortiguación	Amortiguación ajustable
Carrera de amortiguación	27
Tipo de puerto	1/8"

Disponible en Internet:<<http://en2.airtac.com/>>

Figura 7. Actuador neumático SE 32x100



Disponible en Internet :< <http://en2.airtac.com/>>

5.2.2 Electroválvulas. Para realizar el control de los actuadores neumáticos se utilizaron dos electroválvulas marca Festo de referencia MFH-5-1/8 y para el control del eyector de vacío, se utilizó una electroválvula marca Festo de referencia MFH-3-M5. Estas electroválvulas fueron suministradas por el laboratorio de sistemas dinámicos de la Universidad Tecnológica de Pereira, y sus características se muestran en los cuadros 2 y 3 respectivamente.

Cuadro 2. Características de la electroválvula Festo MFH-5-1/8

Característica	Propiedades
Función de las válvulas	5/2 monoestable
Tipo de accionamiento	neumático
Ancho	26mm
caudal nominal normal	500 l/min
Presión de funcionamiento	1.8..8 Bar
Construcción	asiento de plato
Tipo de reposición	muelle mecánico
Función de escape	estrangulable
Tipo de control	prepiloto
Sentido de flujo	no reversible
Tiempo de conmutación a la desconexión	36 ms
Tiempo de conmutación a la conexión	8 ms
Fluido	aire comprimido según ISO8573-1:2010[7:4:4]

Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Opción de funcionamiento con lubricación(necesaria en otro modo de funcionamiento)
Clase de resistencia a la corrosión KBK	1
Temperatura de almacenamiento	- 20....60°C
Temperatura del medio	- 10....60°C
Temperatura ambiente	- 5....40°C
Conexión eléctrica	a través de bobina F
Conexión del aire de escape de pilotaje 82	M5
Conexiones neumáticas	G1/8
Material del cuerpo	fundición inyectada de aluminio

Disponible en Internet :< http://www.festo.com/cms/es-mx_mx/index.htm>

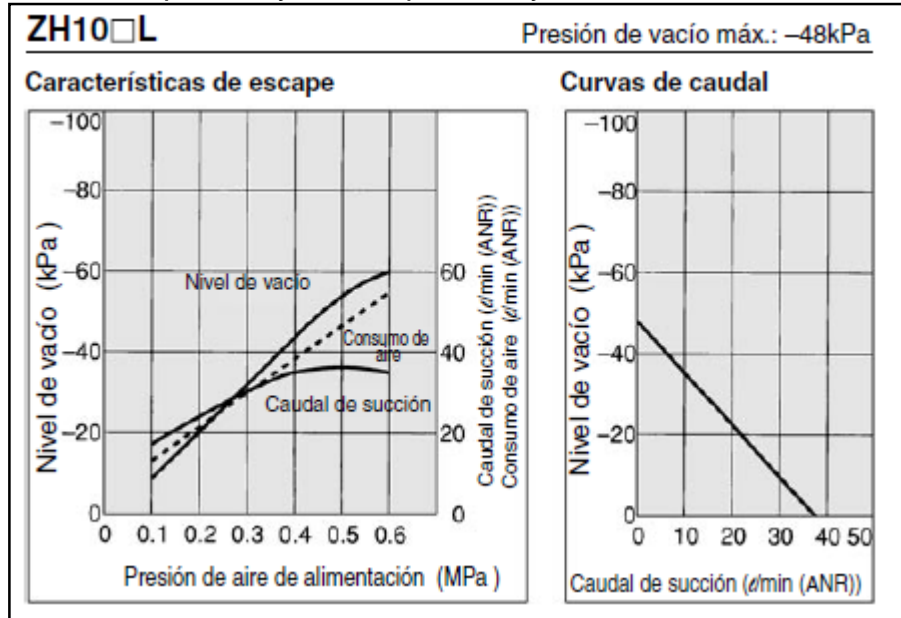
Cuadro 3. Características de la electroválvula Festo MFH-3-M5

Característica	Propiedades
Función de las válvulas	3/2 cerrada monoestable
Tipo de accionamiento	Eléctrico
caudal nominal normal	58 l/min
Presión de funcionamiento	0...8 Bar
Construcción	asiento de plato
Tipo de reposición	muelle mecánico
Diámetro nominal	1.3 mm
Función de escape	no estrangulable
Accionamiento manual auxiliar	mediante pulsador
Tipo de control	Directo
Sentido de flujo	no reversible
Tiempo de conmutación a la desconexión	16 ms
Tiempo de conmutación a la conexión	9 ms
Fluido	aire comprimido según ISO8573-1:2010[7:4:4]
Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Opción de funcionamiento con lubricación(necesaria en otro modo de funcionamiento)
Clase de resistencia a la corrosión KBK	1
Temperatura del medio	- 15....60°C
Temperatura ambiente	- 15....40°C
Conexiones neumáticas	M5

Disponible en Internet :< http://www.festo.com/cms/es-mx_mx/index.htm>

5.2.3 Eyector de vacío. Para la generación de vacío en el elemento de sujeción (ventosa), se utilizó eyector de vacío marca SMC de referencia ZH10L, con las especificaciones mostradas en la figura 8.

Figura 8. Curvas de presión y caudal para el eyector



Disponible en Internet: < <http://www.smc-pneumatics.com/ZH10BS-06-01.html>>

5.3 SELECCIÓN DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS

Los elementos electrónicos que hacen parte del sistema de control del manipulador son los siguientes:

5.3.1 Sensores. Para realizar el control de inicio y fin de carrera de los actuadores neumáticos se eligieron cuatro sensores magnéticos marca Airtac de referencia CS-1E de tipo normalmente abierto, todas sus características se muestran en el cuadro 4.

Figura 9. Sensor Airtac CS-1E



Disponible en Internet: < <http://en2.airtac.com/>>

Cuadro 4. Especificaciones del sensor Airtac CS-1E

Modelo	CS1-E
Cambiar la lógica	tipo STSP normalmente abierto
Tipo de sensor	Interruptor de lengüeta sin contacto
Voltaje de funcionamiento (V)	5-240V AC/DC
Máx. conmutación de corriente(mA)	100
Cambio de clasificación (W)	Máx.10
Consumo de corriente	NO
Caída de voltaje de	2.5V Max .@ 100mA DC
Cable	ϕ 3.3,2C, el petróleo resistente de gris PVC (llama retardada)
Indicador	LED rojo
Fuga de corriente	NO
Sensibilidad(Gauss)	35-45
Max. Frecuencia (Hz)	200
Rango de temperatura °C	-10 ~ 70
Caja de clasificación	IP67(NEMA6)
Circuito de protección	NO

Disponible en Internet: < <http://en2.airtac.com/>>

5.3.2 Tarjetas de control. Para realizar el control PWM del servomotor se utilizó una tarjeta US2Dynamixel utilizando su puerto RS485. Para controlar el resto del circuito neumático y sensores magnéticos, de final e inicio de carrera, se utilizó una tarjeta Arduino MEGA 2560.

El controlador USB2Dynamixel puede ser usado en computadores portátiles y PCs sin puertos seriales para convertir un puerto USB en puerto serial, dentro de sus características están:

- Permite seleccionar entre: RS-232, RS-485, TTL
- Conector de 3P: Puerto de comunicación para niveles TTL
- Conector de 4P: Puerto de comunicación RS-485
- Conector DB9 para RS 232.

Figura 10. Tarjeta USB2Dymanixel



Disponible en Internet: < <http://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/74522-arduino-mega-with-dynamixel-ax-12-servo>>

Se escogió la última versión de la tarjeta Arduino Mega 2560 debido a su precio y funcionalidad; la placa está basada en el microcontrolador ATmega2560. Cuenta con 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 14 pueden ser utilizados como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (hardware con puertos serie), un cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador. Simplemente se conecta al computador con un cable USB o a un adaptador AC - DC con centro positivo o a una batería para empezar. El Mega 2560 es compatible con la mayoría de los shields diseñados para el Arduino Uno o Arduino Duemilanove.

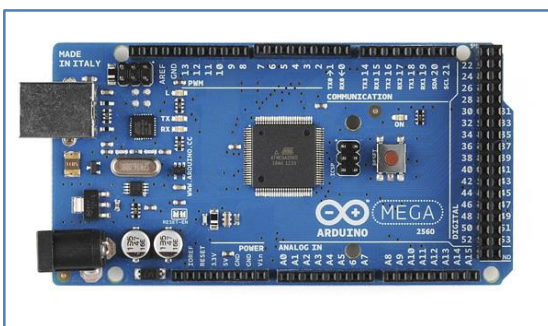
Además de todas las características mencionadas, el Arduino Mega 2560 utiliza un ATmega8U2 en lugar del chip FTDI. Esto permite velocidades de transferencia más rápidas, no necesita drivers para Linux o Mac (para Windows es necesario), y la capacidad de tener al Arduino como un teclado, ratón, joystick, etc. También tiene 256k de memoria flash, sus principales características se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5. Características de la tarjeta Arduino Mega 2560

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de alimentación	7-12 V
E / S digitales	54(14 salidas PWM)
Entradas analógicas	16
Memoria Flash	256k
Velocidad del reloj	16Mhz

Disponible en Internet: < <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>>

Figura 11. Tarjeta Arduino Mega 2560



Disponible en Internet: <<http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoMega2560> >

5.3.3 Servomotor RX-24F. Como elemento de control rotacional se utilizó un servomotor marca Dynamixel referencia RX-24F, con las especificaciones mostradas en el cuadro 6.

Cuadro 6. Especificaciones del servomotor RX24F Dynamixel

Peso :	67g
Tamaño :	35.6mm x 50.6mm x 35.5mm
Control de ángulo mínimo :	0.29°
Motor :	Coreless Motor
Relación de:	193:01:00
Stall Torque :	2.6N.m (at 12V, 2.4A)
No load speed :	126rpm (at 12.V)
Modo de funcionamiento	
o Modo mixto o (0° ~ 300°)	
o Modo de ruedas o (rotación infinita)	
La tensión de :	9 ~ 12V (tensión Recomendadas 11.1V)
CommandSignal : Digital Packet	
Protocol Type :	RS485 Asynchronous Serial Communication (8bit,1stop, No Parity)
Link (Physical) :	RS485 MultiDrop Bus
ID : 254 ID (0~253)	
La velocidad de comunicación:	7843bps ~ 1 Mbps
Feedback :	Position, Temperature, Load, Input Voltage, etc.
Material :	Full Metal Gear, Engineering Plastic Body
Standbycurrent :	50 mA

Disponible en Internet:

<http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/rx_series/rx-24f.htm>

Figura 12. Servomotor RX24F Dynamixel



Disponible en Internet:

<http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/rx_series/rx-24f.htm>

5.4 MONTAJE DEL SISTEMA DE CONTROL

Para controlar el servomotor RX-24F se utilizó la USB2DINAMYXEL que convierte un puerto USB en un puerto serial RS485. Para realizar la escritura de señales digitales, controlar los solenoides de las electroválvulas y hacer lectura de las señales digitales de los sensores se utilizó una tarjeta Arduino Mega2560 que funciona en un rango de 0V a 5V. Debido a que las solenoides de las electroválvulas son activadas por señales de 24V, se tuvo que construir una tarjeta amplificadora mostrada en la figura 15, que permite conmutar las señales de 5V por señales de 24V y un sistema de Pull Down para que al realizar la lectura de los sensores, se evitaren ruidos haciendo buena referencia a tierra en el sistema. Para todos estos propósitos se construyó una caja de control, hecha en acrílico y que consta de 24 conectores tipo RCA, mostrada en la figura 13.

Figura 13. Caja de control



La tarjeta amplificadora y el Pull Down fueron desarrollados en circuitos impresos universales, estos dos componentes se pueden ver en la figura 14.

Figura 14. Vista interior caja de control

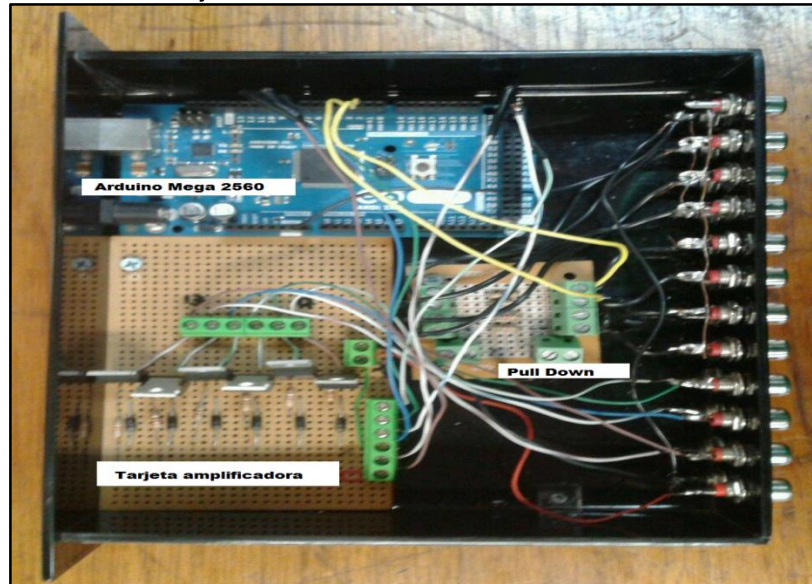
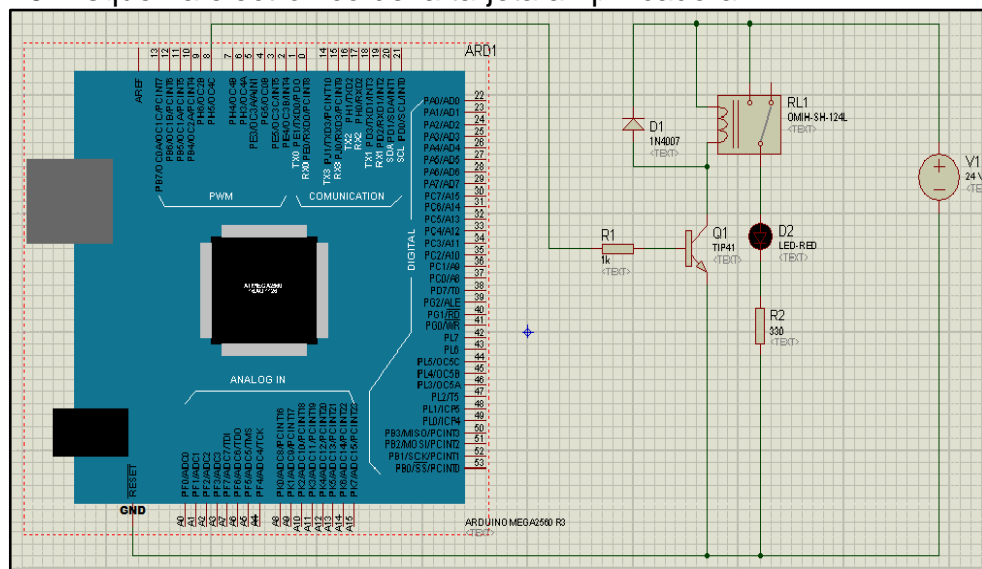


Figura 15. Esquema electrónico de la tarjeta amplificadora



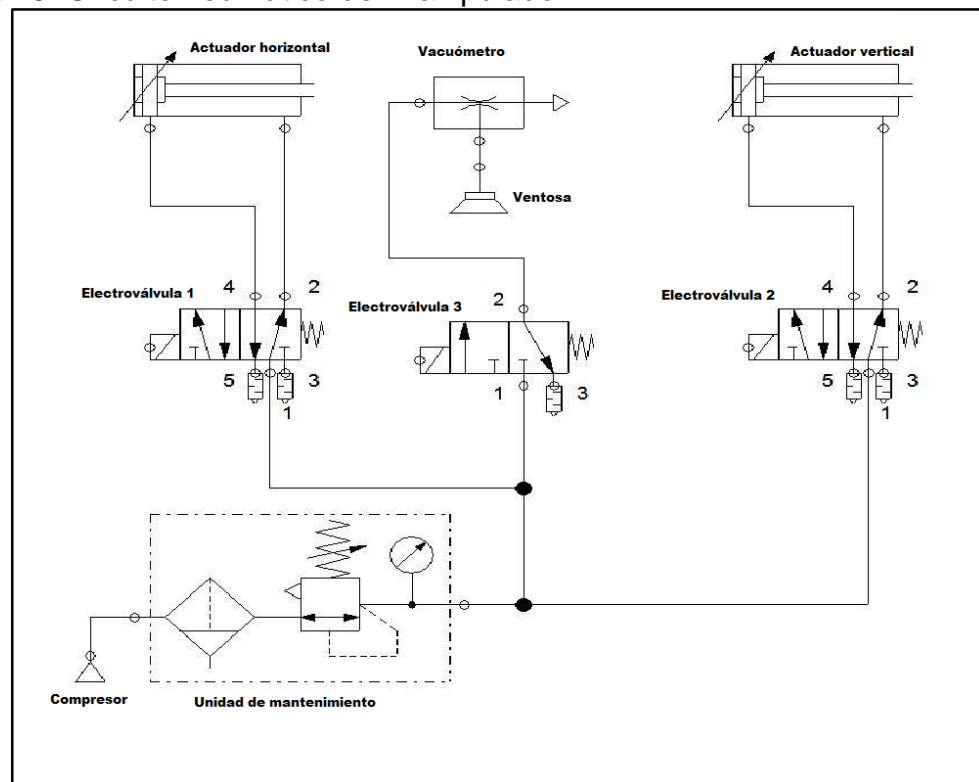
En la figura 15, se puede observar el circuito utilizado para conmutar la señal de 5V proveniente de un pin digital Arduino, a una señal de 24 V necesaria para accionar el solenoide de las electroválvulas. Este esquema muestra el

funcionamiento para un pin, solo a modo de ilustración, pues, se manejaron en total seis salidas digitales, es decir, la tarjeta amplificadora cuenta con seis arreglos como el de la ilustración.

5.5 CIRCUITO NEUMÁTICO DEL MANIPULADOR

De los tres grados de libertad del manipulador, dos son de carácter lineal, para este propósito se utilizaron actuadores neumáticos de doble efecto. Cabe resaltar que el efector final del manipulador es también de carácter neumático, para realizar sujeción por vacío. Cada elemento va acompañado por su respectivo elemento neumático de control (electroválvulas), por consiguiente fue necesario diseñar e instalar un circuito neumático, este circuito se expone en la figura 16.

Figura 16. Circuito neumático del manipulador

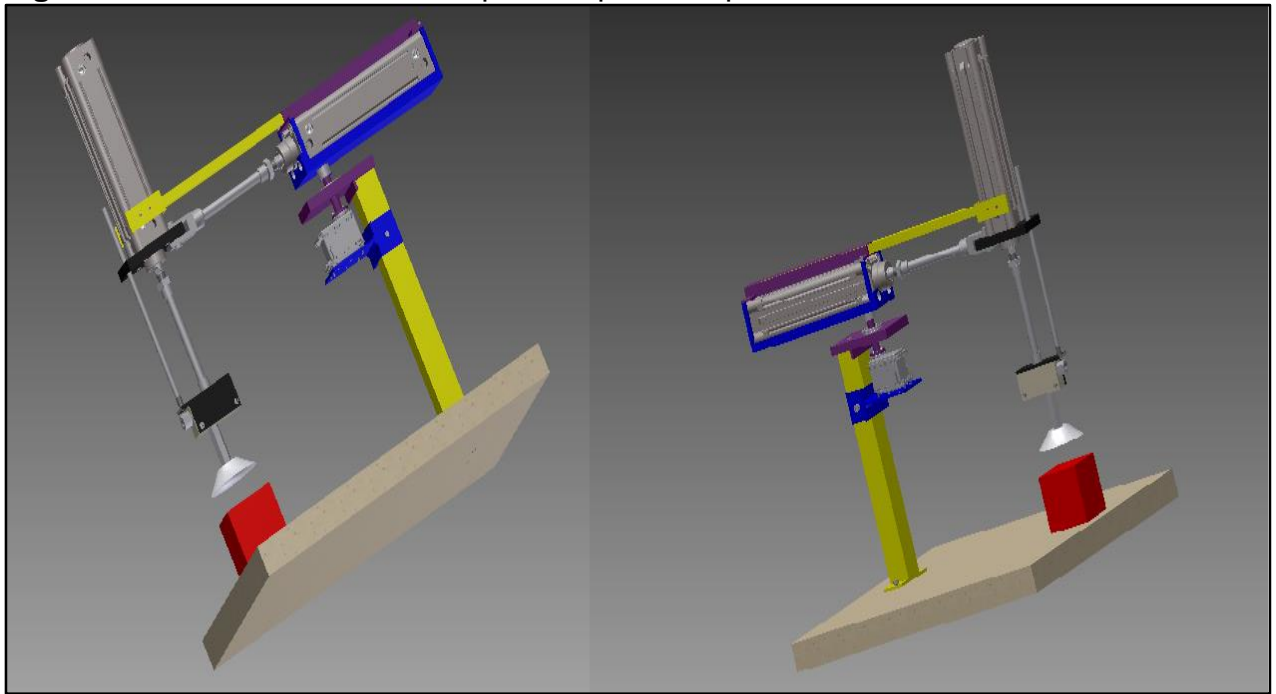


5.6 DISEÑO EN CAD DE ELEMENTOS MECÁNICOS

Para culminar el modelo físico del manipulador, se diseñó el modelo necesario que acoplara y soportara los actuadores neumáticos y el servomotor, de manera que, se cumplieran los requerimientos mecánicos y geométricos. El diseño fue realizado en el software CAD Autodesk Inventor Professional 2011. Con el diseño en CAD terminado, se ejecutó el mecanizado de las partes.

Como criterio de diseño se tuvieron en cuenta las necesidades de acoplar los elementos neumáticos y electrónicos, de configurar la geometría física de un manipulador de tipo cilíndrico, y de diseñar una estructura apta para la ejecución de los actuadores, este diseño preliminar es expuesto en la figura 17.

Figura 17. Diseño inicial del manipulador pick and place con 3 GDL.



5.7 CONSTRUCCIÓN DEL MANIPULADOR

Inicialmente se respetaron los planos realizados en el software de CAD, Autodesk Inventor 2011, sin embargo, a medida que se fue desarrollando la construcción y pruebas de montaje del manipulador se realizaron algunos cambios para mejorar su estructura y funcionamiento. Se manejaron únicamente dos tipos de roscas en el manipulador; M6x1 y M10x1, con longitudes entre 10 y 30 mm. Las piezas que no se alteraron de acuerdo a los planos iniciales, que se muestran entre las figuras 18 y 21, son:

- El alojamiento del actuador neumático horizontal
- El eje del servomotor
- La base para el soporte del servomotor
- El acople para actuadores neumáticos de horizontal a vertical marca Airtac, referencia F-SI32-FA

- El acople para actuadores neumáticos de horizontal a vertical marca Airtac, referencia F-SI32-FA

Al alojamiento del actuador horizontal (ver figura 18), se le agregó una laminilla con disposición vertical y dos rodamientos (uno fijo y uno graduable), que hacen contacto con el disco que sirve como guía del movimiento rotacional y a su vez como soporte, evitando así que el giro o momento, generado por el peso del sistema superior del manipulador recaigan en el eje del servomotor.

Se mecanizó un eje escalonado (ver figura 19), conservando las medidas iniciales del diseño y se acopló con un rodamiento comercial, previamente seleccionado de referencia 6200-2RS y marca SKF. Este eje por un extremo se ensambla a la flecha de salida del servomotor Dynamixel RX-24F y por el otro es roscado con el alojamiento del actuador neumático de disposición horizontal.

La base para el soporte del servomotor (ver figura 20), cuenta con las medidas inicialmente planificadas, no obstante, la perforación en la cual el soporte del servomotor va ensamblado, se varió de disposición lateral a frontal, debido a que, el soporte del servomotor sufrió una variación durante la construcción.

El acople para configurar dos actuadores neumáticos el uno horizontal y el otro vertical (ver figura 21), es marca Airtac, referencia F-SI32-FA es de tipo comercial, sin embargo, se necesitó realizarle una perforación en el centro, pues de fábrica viene solo con cuatro perforaciones de 7 mm, distribuidas en sus esquinas, este elemento es sujetado por una pinza permitiendo ensamblar un actuador de manera horizontal con uno en disposición vertical.

Figura 18. Alojamiento del actuador neumático horizontal

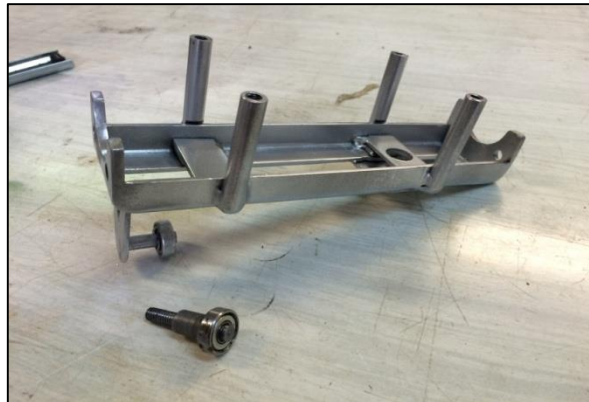


Figura 19. Eje del servomotor



Figura 20. Base para el soporte del servomotor

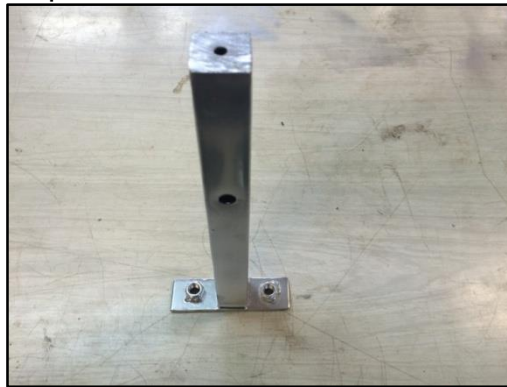


Figura 21. Acople para actuadores neumáticos de horizontal a vertical marca Airtac, referencia F-SI32-FA



5.7.1 Variaciones en la construcción del manipulador. El diseño inicial fue variando durante la construcción y el montaje del manipulador. Algunos elementos

fueron eliminados, variados o adicionados para obtener así mejores resultados en el desempeño, estos elementos son mostrados entre las figuras 22 y 28, y son los siguientes:

- Soporte circular
- Disco circular para guía del movimiento rotacional
- Soporte servomotor
- Guías lineales
- Placa soporte de guías lineales
- Abrazadera regulable para actuador vertical
- Sistema anti giro vástago actuador vertical

Debido a los requerimientos de robustez de los manipuladores robóticos y a la necesidad de guiar el movimiento de giro se construyó una base circular (ver figura 22), con un diámetro de 158 mm, a partir de un tubo de acero recortado, se soldó a una base rectangular, con perforaciones en las esquinas para ser fijado por medio de tornillos a la base de trabajo del manipulador, con cuatro pestañas soldadas distribuidas a 90° una de la otra, para así ser fijado por su parte superior al disco circular que guía el movimiento rotacional. Posteriormente esta pieza fue tratada con un proceso de cromado para mejorar su estética y prolongar su conservación.

Se construyó un disco de 260 mm de diámetro (ver figura 23), para guiar el movimiento rotacional del manipulador y soportar el peso de la parte superior de este. El disco tiene un mecanizado en el centro para el alojamiento del rodamiento 6200-2RS y cuatro perforaciones dispuestas a 90 °, para ser fijado por medio de tornillos al soporte global circular del manipulador.

Para alojar y soportar el servomotor (ver figura 24), se dobló, perforó y mecanizó con la forma de su parte inferior, una lámina de 37 mm de ancho y 110 mm de largo. La ranura fue realizada de forma tal que se pudiera reubicar el punto de fijación durante los cambios que iban sufriendo las piezas del manipulador, y también para hacer más flexible el montaje evitando que el elemento estuviese expuesto a carga por error en las medidas.

Para guiar el movimiento horizontal, y evitar el giro del actuador vertical, se modificaron 2 correderas lineales comerciales (ver figura 25), y se acoplaron a una base rectangular (ver figura 26), que encaja en el alojamiento del actuador horizontal.

Para acoplar las guías horizontales al actuador vertical, y evitar así su giro, se construyó una abrazadera regulable (ver figura 27), que por medio de tornillos y una perforación roscada a cada lado que permite ensamblarla en las correderas.

Finalmente, para evitar el giro del vástago del actuador vertical se construyó una pieza plástica que se sujeta al eyector de vacío de la ventosa (ver figura 28), y se ensambla en dos varillas circulares que pasan por los orificios del acople F-SI32-FA.

Figura 22. Soporte circular



Figura 23. Disco circular para guía del movimiento rotacional



Figura 24. Soporte servomotor



Figura 25. Guías lineales



Figura 26. Placa soporte de guías lineales



Figura 27. Abrazadera regulable para actuador vertical

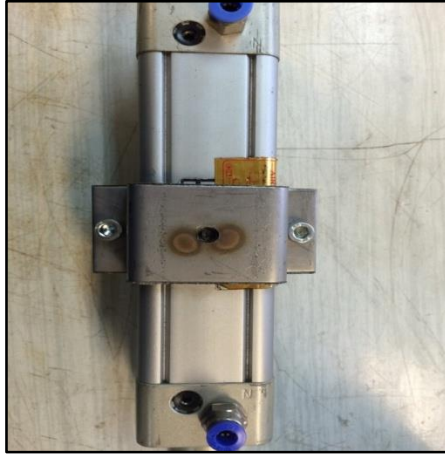
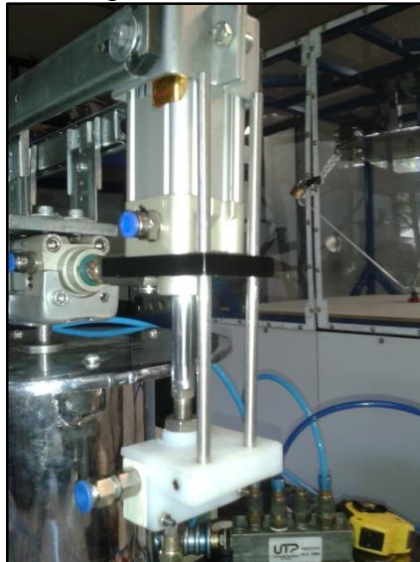
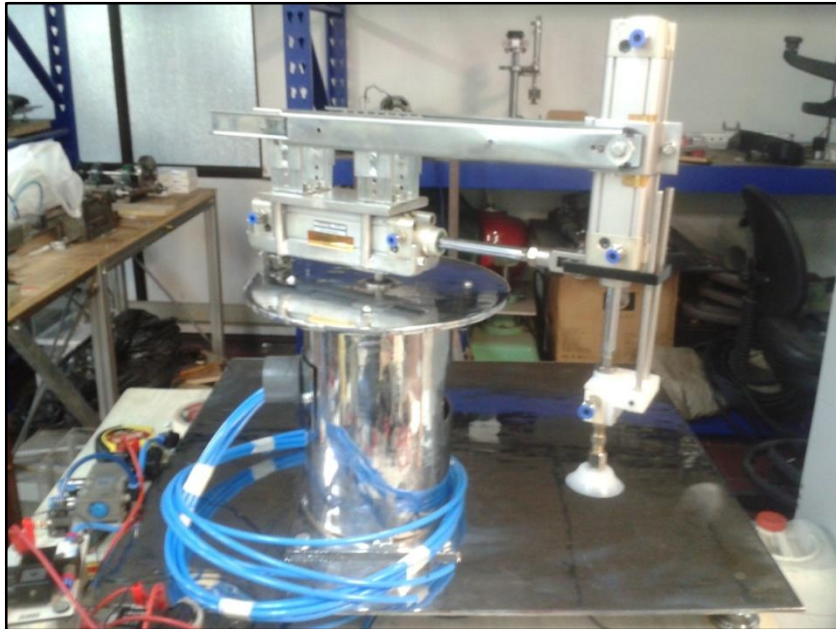


Figura 28. Sistema anti giro vástago actuador vertical



Después de terminadas todas las partes que componen el manipulador, se obtuvo el ensamble total como se observa en la figura 29.

Figura 29. Ensamble total manipulador pick and place con 3 GDL



6. CINEMÁTICA Y MODELOS MATEMÁTICOS DEL MANIPULADOR

En este capítulo se presentan los análisis matemáticos necesarios para explicar el comportamiento cinemático del manipulador.

6.1 VOLUMEN DE TRABAJO

El volumen de trabajo de un actuador describe esencialmente el espacio dentro del cual se desplaza su muñeca. Un actuador cilíndrico posee un volumen de trabajo regular, es decir; su espacio de trabajo es geométricamente semejante a un cilindro.

Esta configuración consta de una articulación rotacional con una libertad de giro entre 0° y 270° (normalmente los manipuladores cilíndricos no giran los 360 °), y dos articulaciones prismáticas dispuestas de manera perpendicular entre sí con una libertad de actuación lineal entre 0 y 100 mm. El elemento es de interés sobre todo en células flexibles, con el robot situado en el centro, sirviendo otras máquinas dispuestas de manera radial a su alrededor, máquinas de control numérico para el transporte de herramientas, utilizado para la selección de piezas, la industria farmacéutica, la ubicación de productos para empaque, en pintura o soldadura, cuando su trayectoria y espacio de trabajo lo permiten.

Se parte entonces del volumen de un cilindro para calcular el volumen de trabajo; como la trayectoria no describiría un cilindro completo al no girar 360 °, sino, 270 °, es decir, 3/4 partes de un cilindro como lo muestra la figura 30. Se debe tener en cuenta el espacio de trabajo muerto que se ocasiona por la configuración de nuestro manipulador, entonces; el volumen total de trabajo es producto de la diferencia del volumen máximo, producto del final de la carrera del actuador horizontal y el volumen muerto, ocasionado por la distancia entre el eje del elemento rotacional y el inicio de la carrera del actuador horizontal, describiendo geométricamente un cilindro hueco en el centro. Las siguientes ecuaciones hacen parte del análisis del volumen de trabajo real del manipulador, en concordancia con los análisis anteriores.

$$V_T = \frac{3}{4} \pi r_{Max}^2 h - \frac{3}{4} \pi r_{Min}^2 h \quad (1)$$

Dónde:

V_T = Volumen total de trabajo

r_{Max} = Radio máximo del manipulador, es decir, el final de la carrera del actuador horizontal

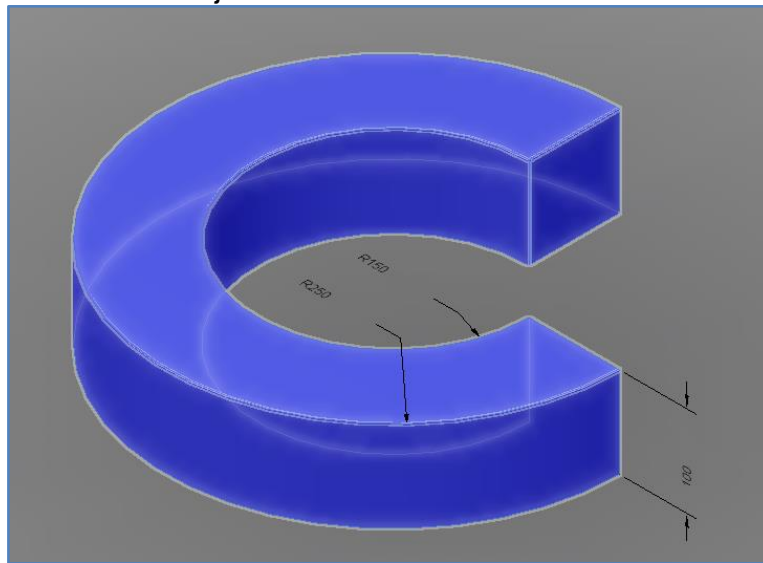
r_{Min} = Radio mínimo del manipulador, es decir, el inicio de la carrera del actuador horizontal

h = Es la altura del cilindro, en este caso, el fin de la carrera del actuador vertical

Agrupado términos comunes en (1):

$$V_T = \frac{3}{4}\pi h(r_{Max}^2 - r_{Min}^2) \quad (2)$$

Figura 30. Volumen de trabajo.

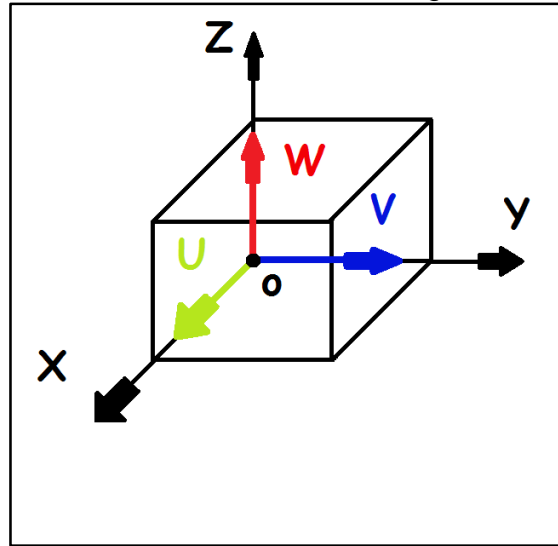


6.2 CINEMÁTICA DIRECTA

Se utiliza álgebra vectorial y matricial para el desarrollo de un método generalizado y sistemático para describir y representar la localización de los elementos de un brazo con respecto a un sistema de referencia fijo. Como los elementos de un brazo pueden girar y/o trasladarse con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, se establecerá un sistema de coordenadas ligado al cuerpo a lo largo del eje de la articulación para cada elemento. El problema cinemático directo se reduce a encontrar una matriz de transformación que relaciona el sistema de coordenadas ligado al cuerpo al sistema de coordenadas de referencia. La figura 31 muestra el Sistema de coordenadas de referencia

ligado al cuerpo. Se utiliza una matriz de rotación 3x3 para describir las operaciones rotacionales del sistema ligado al cuerpo con respecto al sistema de referencia. Se usan entonces las coordenadas homogéneas para representar vectores de posición en un espacio tridimensional, y las matrices de rotación se ampliarán a matrices de transformación homogénea 4x4 para incluir las operaciones de traslación del sistema de coordenadas ligado al cuerpo. Esta representación matricial de un elemento mecánico rígido para describir la geometría espacial de un brazo fue utilizada por primera vez por Denavit y Hatenberg en 1955. Para exponer matemáticamente los criterios mencionados anteriormente, se exhibe un ejemplo para un punto P aleatorio:

Figura 31. Sistema de coordenadas de referencia ligado al cuerpo.



Una matriz de rotación 3x3 opera sobre un vector de posición en un espacio euclídeo tridimensional que relaciona las coordenadas a un sistema rotado OUVW (sistema ligado al cuerpo) en un sistema de coordenadas de referencia OXYZ.

Para una posición en partículas P_{uvw} se tiene.

$$P_{uvw} = (P_u, P_v, P_w)^T Y P_{xyz} = (P_x, P_y, P_z)^T \quad (3)$$

T=convención para transpuesta.

Se puede encontrar una matriz R de transformación 3x3 que transforme las coordenadas P_{uvw} respecto a OXYZ después que el sistema de coordenadas OUVW ha sido girado.

$$P_{xyz} = R P_{uvw} \quad (4)$$

$$P_{uvw} = P_u i_u + P_v j_v + P_w k_w \quad (5)$$

P_x, P_y, P_z : Son los componentes de P a lo largo de los ejes OX, OY, OZ.

$$P_x = i_x \cdot P = i_x i_u P_u + i_x j_v P_v + i_x k_w P_w$$

$$P_y = i_y \cdot P = i_y i_u P_u + i_y j_v P_v + i_y k_w P_w$$

$$P_z = i_z \cdot P = i_z i_u P_u + i_z j_v P_v + i_z k_w P_w$$

Expresándolo en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v & i_x k_w \\ j_y i_u & j_y j_v & j_y k_w \\ k_z i_u & k_z j_v & k_z k_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix}$$

Siendo la matriz 3x3 la matriz R , y, análogamente se puede decir qué:

$$P_{uvw} = Q P_{xyz} \quad (6)$$

Lo cual por conmutación de productos lleva a:

$$Q = R^{-1} = R^T \quad (7)$$

$$QR = R^T R = R^{-1} R = I_3 \quad (8)$$

Siendo I_3 la matriz identidad.

La intención del ejemplo anterior era encontrar las matrices de rotación que representan rotaciones del sistema OUVW respecto a los ejes principales de referencia OXYZ. Si el sistema se gira a α° respecto al eje OX entonces el punto P_{uvw} con coordenadas $(P_u, P_v, P_w)^T$ con respecto a OUVW tendrá coordenadas diferentes a $(P_x, P_y, P_z)^T$ con respecto al sistema OXYZ. La matriz $R_{x,\alpha}$ se llama matriz de rotación con respecto al eje OX con un ángulo α , entonces:

$$P_{xyz} = R_{x,\alpha} P_{uvw} \quad (9)$$

Con $i_x \equiv i_u$, con respecto a OX:

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

Respecto a OY:

$$R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix}$$

Respecto a OZ:

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las matrices de rotación se pueden multiplicar entre sí para representar la secuencia de rotación respecto a OXYZ, lo que se denomina una matriz de rotación compuesta. Es importante tener en aclarar que las matrices no conmutan por eso se debe tener en cuenta el orden.

$$R = R_{y,\phi} R_{z,\theta} R_{x,\alpha} \quad (10)$$

En esta secuencia el primer eje que rota es α .

$$\begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta & \sin\phi\sin\alpha - \cos\phi\sin\theta\cos\alpha & \cos\phi\sin\theta\sin\alpha + \sin\phi\cos\alpha \\ \sin\theta & \cos\theta\cos\alpha & -\cos\alpha \\ -\sin\phi\cos\theta & \sin\phi\sin\theta\cos\alpha + \cos\phi\sin\alpha & \cos\phi\cos\alpha - \sin\phi\sin\theta\sin\alpha \end{bmatrix}$$

Como una matriz de rotación 3x3 no da posibilidad para la traslación y el escalado, se introduce una cuarta coordenada o componente al vector de posición $P =$

$(P_x, P_y, P_z)^T$ transformándolo en $\hat{P} = (wP_x, wP_y, wP_z, w)^T$, entonces se dice que el vector \hat{P} se exprese en coordenadas homogéneas. La representación vectorial en coordenadas homogéneas permite en un espacio euclídeo tridimensional desarrollar transformaciones matriciales para la rotación, escalado, rotación y transformación de perspectiva, también, representar un vector de posición de N componentes por un vector de $(N+1)$ componentes se llama representación en coordenadas homogéneas. En robótica es común utilizar un factor de escala W que es igual a 1, las coordenadas físicas se relacionan con coordenadas homogéneas de la siguiente manera:

$$P_x = \frac{wP_x}{w} P_y = \frac{wP_y}{w} P_z = \frac{wP_z}{w} \quad (11)$$

La matriz de transformación homogénea es una matriz 4x4 que transforma un vector posición expresado en coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro y se puede dividir en cuatro sub-matrices:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ f_{1x3} & 1x1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{matriz de rotación} & \text{vector de posición} \\ \text{---} & \text{---} \\ f_{1x3} & 1x1 \end{bmatrix}$$

Las matrices de rotación homogéneas básicas, son:

$$T_{x,\alpha} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$T_{y,\phi} = \begin{vmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & -\sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$T_{z,\theta} = \begin{vmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

En una matriz de translación homogénea básica la diagonal produce escalado global y local, los valores de las coordenadas se alargan mediante los escalares a , b , c .

$$T_{trans} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_x \\ b_y \\ c_z \\ S \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \\ S \end{vmatrix}$$

En las matrices de rotación básicas, T_{rot} , no se produce efecto de escalado local, el cuarto elemento diagonal produce escalado global, entonces, si $S > 1$ las coordenadas se reducen y si $0 < S < 1$ las coordenadas se alarga. Si $S > 0$ las coordenadas físicas del vector son:

$$P_x = \frac{X}{S}, P_y = \frac{Y}{S}, P_z = \frac{Z}{S}, w = \frac{S}{S} = 1 \quad (12)$$

Entonces; una matriz de transformación homogénea 4x4 transforma un vector expresado en coordenadas homogéneas con respecto al sistema de coordenadas OUVW en el sistema de coordenadas de referencia OXYZ, usando un $W=1$.

$$\hat{P}_{xyz} = T\hat{P}_{uvw} \quad \text{Con } W=1 \quad (13)$$

$$T = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

6.2.1 Representación de Denavit-Hartenberg. Denavit y Hatenberg crearon un algoritmo que permite obtener el modelo cinemático directo. Este método permite establecer sistemas de coordenadas ligados a cada eslabón para obtener la cinemática del mecanismo. Después de definidas los sistemas de coordenadas se pasa de uno a otro por medio de transformaciones básicas (rotaciones y traslaciones) , que , a su vez dependen de las características geométricas de cada eslabón, relacionando así un sistema de coordenadas con otro; las transformaciones que se utilizan son:

- Rotación alrededor del eje Z_{i-1} un ángulo θ_i .
- Traslación a lo largo de Z_{i-1} una distancia d_i ; vector $(0, 0, d_i)$.
- Traslación a lo largo de x_i una distancia a_i ; vector $(a_i, 0, 0)$.
- Rotación alrededor del eje x_i un ángulo α_i .

Donde:

θ_i Es el ángulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} , utilizando la regla de la mano derecha. Es un parámetro para articulaciones giratorias.

d_i Es la distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas (i-1)-ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i . En articulaciones prismáticas es un parámetro variable.

a_i Es la distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i-ésimo, en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i .

a_i Es el ángulo de separación del eje z_{i-1} , medido en un plano perpendicular a x_i , utilizando la regla de la mano derecha.¹²

Cuadro 7. Parámetros Denavit-Hartenberg

PARÁMETROS D-H				
Articulación	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	θ_1	0	0	d0
2	0	90°	0	d1
3	0	90°	0	d2

θ_1 : Para nuestro caso este ángulo oscila entre 0° y 270°.

d0: 23, 5 mm.

d1: L1+150; 0<L1<100 mm

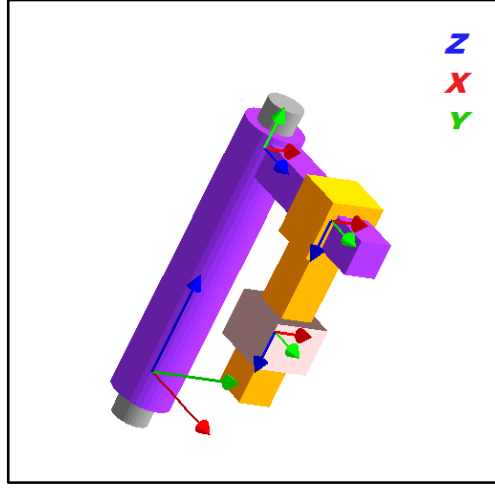
d2: L2+140; 0<L2<100 mm

L1= Carrera actuador horizontal

L2= Carrera actuador vertical

¹ **FU, K.S; GONZALEZ, R.C y LEE, C.S.G.** Robotics: control, sensing, visión and intelligence. United States of America. Mc Graw Hill, 1987, p 13-75.

Figura 32. Establecimiento de coordenadas articulares para un robot cilíndrico (RPP)



$$({}^{i-1}A_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^0 = A_1 A_2 A_3 \quad (14)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

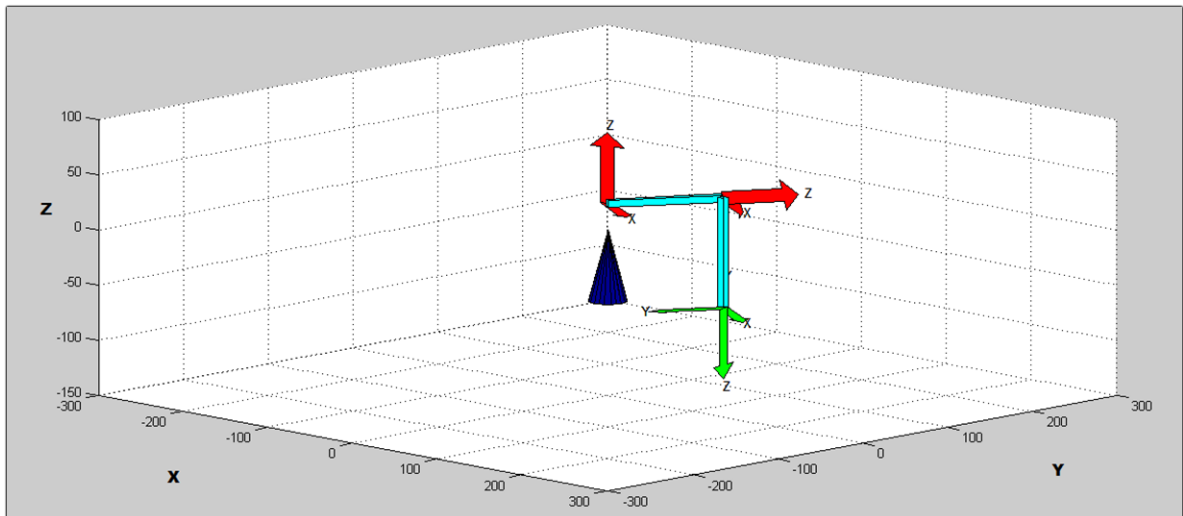
$$T_0^3 = {}^1A_2 A_3 \quad (14.1)$$

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & -d_2\sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & d_2\cos\theta_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Como los ejes no son coincidentes entre sí, a la matriz se le agregan las distancias correspondientes, para hacer exactos los cálculos.

6.2.2 Comprobación gráfica de la cinemática directa. Como la principal función del modelo cinemático directo es relacionar la localización de los elementos articulares de una cadena cinemática con respecto a un eje de referencia fijo, normalmente ubicado en la base, se realizó la comprobación de forma gráfica, apoyados en la herramienta computacional Hemero, que es una toolbox disponible en red de manera gratuita para ejecutarse en el software Matlab, como se ilustra en la figura 33.

Figura 33. Representación gráfica del manipulador RPP con 3 grados de libertad en Hemero toolbox.



6.3 PROBLEMA CINEMÁTICO INVERSO

El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial.

Así cómo es posible abordar el problema cinemático directo de una manera sistemática a partir de la utilización de matrices de transformación homogéneas, e independientemente de la configuración del robot, no ocurre lo mismo con el problema cinemático inverso, siendo el procedimiento de obtención de las ecuaciones fuertemente dependiente de la configuración del robot.

Se han desarrollado algunos procedimientos genéricos susceptibles de ser programados, de modo que un computador pueda, a partir del conocimiento de la cinemática del robot (con sus parámetros de DH, por ejemplo) obtener la n-upla de valores articulares que posicionan y orientan su extremo. El inconveniente de estos procedimientos es que se trata de métodos numéricos iterativos, cuya velocidad de convergencia e incluso su convergencia en si no está siempre garantizada.

A la hora de resolver el problema cinemático inverso es mucho más adecuado encontrar una solución cerrada. Esto es, encontrar una relación matemática explícita de la forma:

$$q_k = F_k(x, y, z, a, \beta, g)$$

$$K = 1 \dots n \text{ (grados de libertad)}$$

Este tipo de solución presenta, entre otras, las siguientes ventajas:

1. En muchas aplicaciones, el problema cinemático inverso ha de resolverse en tiempo real (por ejemplo, en el seguimiento de una determinada trayectoria). Una solución de tipo iterativo no garantiza tener la solución en el momento adecuado.
2. Al contrario de lo que ocurría en el problema cinemático directo, con cierta frecuencia la solución del problema cinemático inverso no es única; existiendo diferentes n-uplas $(q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ que posicionan y orientan el extremo del robot

De mismo modo. En estos casos una solución cerrada permite incluir determinadas reglas o restricciones que aseguren que la solución obtenida sea la más adecuada posible.

No obstante, a pesar de las dificultades señaladas, la mayor parte de los robots poseen cinemáticas relativamente simples que facilitan en cierta medida la resolución de su problema cinemático inverso.

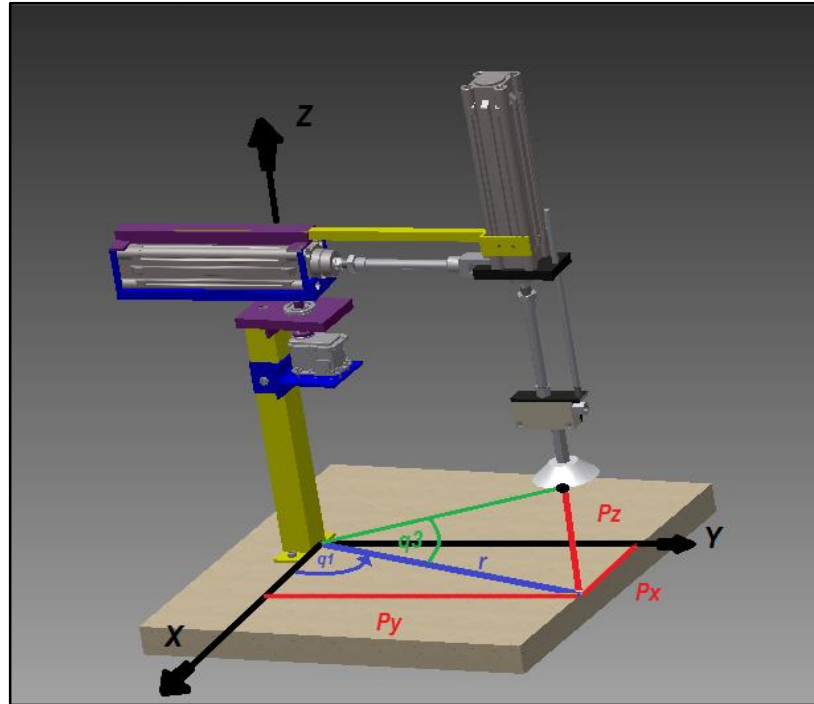
Por ejemplo si se consideran solo tres primeros grados de libertad de muchos robots, estos tienen una estructura planar, esto es, los tres primeros elementos quedan contenidos en un plano. Esta circunstancia facilita la resolución del problema. Así mismo, en muchos robots se da la circunstancia de que los tres grados de libertad últimos, dedicados fundamentalmente a orientar el extremo del robot, correspondan a giros sobre los ejes que se cortan en un punto.

De nuevo esta situación facilita el cálculo de la n -upla $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ correspondiente a la posición y orientación deseadas. Por lo tanto, para los casos citados y otros, es posible establecer ciertas pautas generales que permitan plantear y resolver el problema cinemático inverso de una manera sistemática.

Para obtener los valores de las primeras variables articulares, que son las que posicionan el robot, se utilizan métodos geométricos, que abordan relaciones geométricas y trigonométricas sobre los elementos del robot.

Para la solución de este problema particular se utilizó un método geométrico, haciendo una resolución de triángulos formados por los elementos y articulaciones del robot, como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Relaciones trigonométricas para la cinemática inversa del manipulador.



$$0 < \theta = q_1 < 270^\circ$$

$$\tan q_1 = \frac{p_y}{p_x} \quad (15)$$

$$q_1 = \tan^{-1} \frac{p_y}{p_x} \quad (16)$$

$$r = q_2$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad \text{ó} \quad r^2 = p_x^2 + p_y^2 \quad (17)$$

$$\tan q_3 = \frac{p_z}{r}$$

$$q_3 = \tan^{-1} \frac{p_z}{r}$$

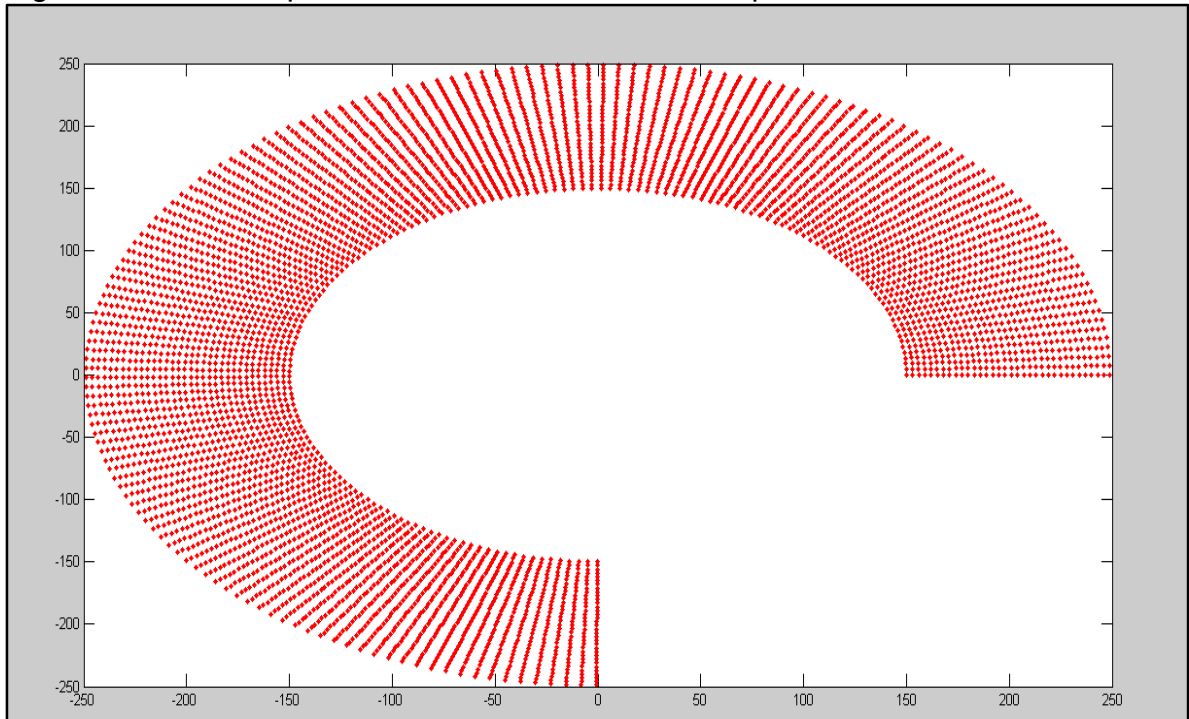
$$q_3 = \tan^{-1} \frac{p_z}{q_2} \quad (18)$$

Según las anteriores deducciones trigonométricas para encontrar el vector de coordenadas articulares, también llamado q_k , que es el que indica la ubicación del efector final en cualquier posición, es:

$$q_k = \left(\tan^{-1} \frac{p_y}{p_x}, r, \tan^{-1} \frac{p_z}{r} \right)$$

6.3.1 Comprobación gráfica al problema cinemático inverso. Como la solución del problema cinemático inverso no es única; para realizar comprobación de nuestro modelo, también se utilizó el apoyo en las herramientas matemáticas que ofrece el software Matlab, logrando conocer los posibles puntos de ubicación del efector final en el plano XY, utilizando las funciones trigonométricas que relacionan este plano, como se muestra en la figura 35, teniendo claro que estas posiciones varían a lo largo del eje Z, entre 0 y 100 unidades de altura, en este caso milímetros, y, en coordenadas entre 70 y 170 en el eje Z .

Figura 35. Posibles posiciones del efector final en el plano XY



7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo expone las secuencias de programación construidas para el manipulador por medio del método Grafcet, se realiza un análisis del comportamiento del servomotor y del modelo cinemático.

7.1 SECUENCIAS DE PROGRAMACIÓN

El manipulador construido es reprogramable. Para ejemplificar cómo funciona, se realizaron tres secuencias de prueba con la finalidad de mostrar la versatilidad de usos que este tiene dentro de su espacio de trabajo. Como su efector final es una ventosa neumática, se sintetizaron secuencias de transporte de piezas o materiales dentro del volumen de trabajo, debido a errores de retraso en la lectura de señales digitales en el software Matlab se obviaron los sensores magnéticos que previamente habían sido probados en secuencias programadas en lenguaje Arduino. Por consiguiente el algoritmo computacional construido para las secuencias finales es comandado a razón del tiempo, sin lectura de señales digitales.

La ilustración de las secuencias será realizada por medio del método gráfico GRAFCET, que es una forma de realizar descripción de procesos, independiente a la tecnología exterior empleada y que puede ser interpretado por personas no especialistas en temas de automatización. Actualmente gran diversidad de autómatas programables traen incorporadas algunas instrucciones de programación que permiten introducir directamente el diagrama GRAFCET. En otros casos existen programas en capacidad de compilar el diagrama gráfico GRAFCET traduciéndolo al lenguaje de la máquina, con unas amplias ventajas de flexibilidad y rapidez de diseño. Es de resaltar que el GRAFCET no debe confundirse con un lenguaje de programación, es solo un método gráfico que permite explicar las acciones realizadas por un automatismo.

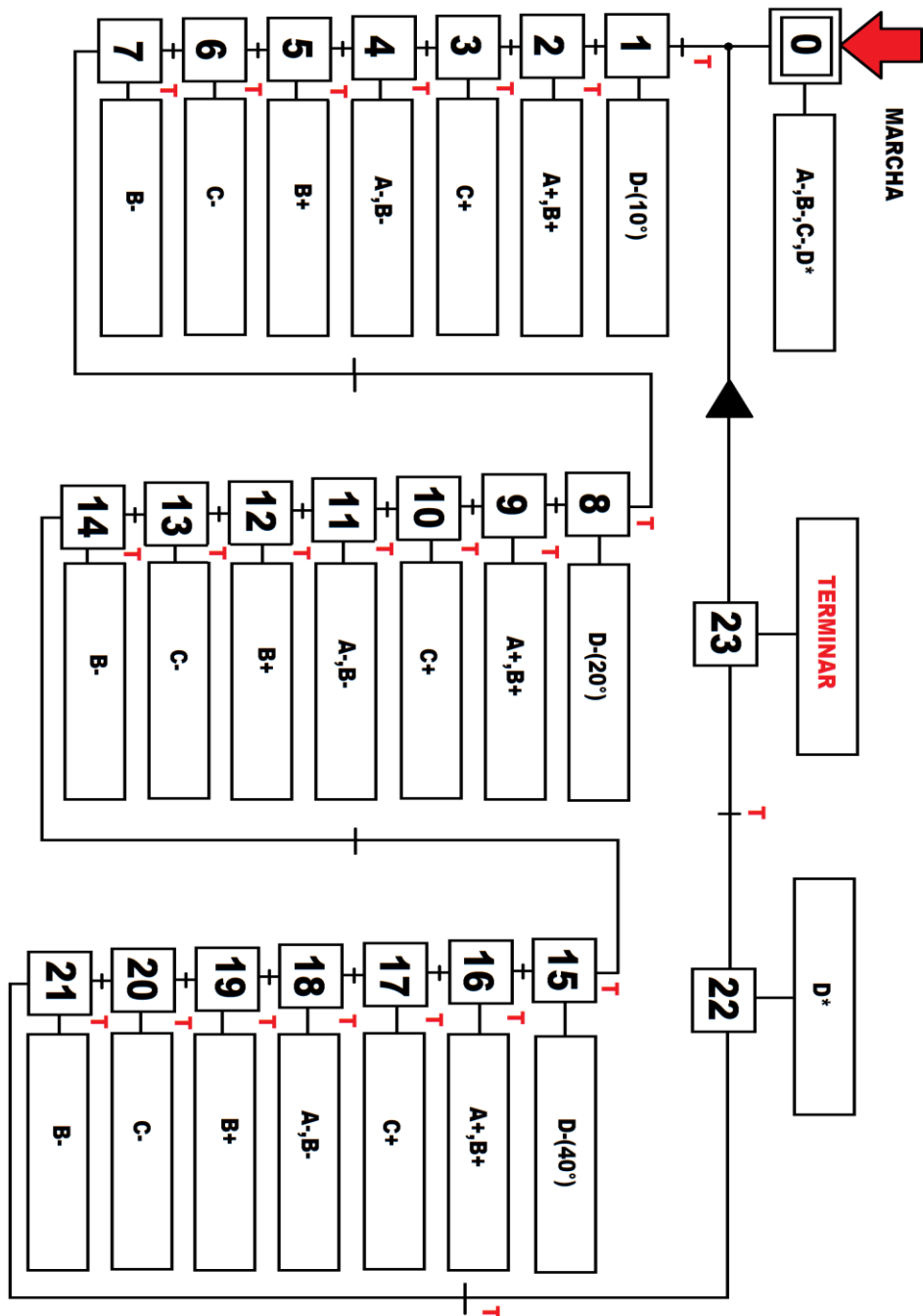
El diagrama GRAFCET cuenta con dos componentes elementales; las etapas y las transiciones. Las etapas son donde se albergan las acciones que, a su vez se pueden dividir en acciones más pequeñas llamadas micro-etapas; en cuanto a las transiciones, son las condiciones que se deben cumplir para pasar de una etapa a otra y albergan las receptividades que, en términos generales, son las condiciones para realizar el traslado de etapa, como por ejemplo; un final de carrera, la lectura de un sensor o un temporizador. En la tabla 1 se muestran las acciones y receptividades que participan en la automatización del manipulador.

Tabla 1. Acciones y receptividades del manipulador

ACCIONES
A+ : Solenoide electroválvula actuador horizontal ON
A- : Solenoide electroválvula actuador horizontal OFF
B+ : Solenoide electroválvula actuador vertical ON
B- : Solenoide electroválvula actuador vertical OFF
C+ : Solenoide electroválvula ventosa neumática ON
C- : Solenoide electroválvula ventosa neumática OFF
D+(K°) : Orden de giro en sentido horario del servomotor (Siendo K el valor numérico de grados en el que se desea posicionar el objetivo, en un rango de 0 a 300 ° sentido anti horario)
D-(K°) : Orden de giro en sentido anti horario del servomotor (Siendo K el valor numérico de grados en el que se desea posicionar el objetivo, en un rango de 0 a 300 ° sentido anti horario)
D* : Orden de enviar el servomotor a su posición 0 °
RECEPTIVIDADES
T : Temporizador, pausa o retraso.

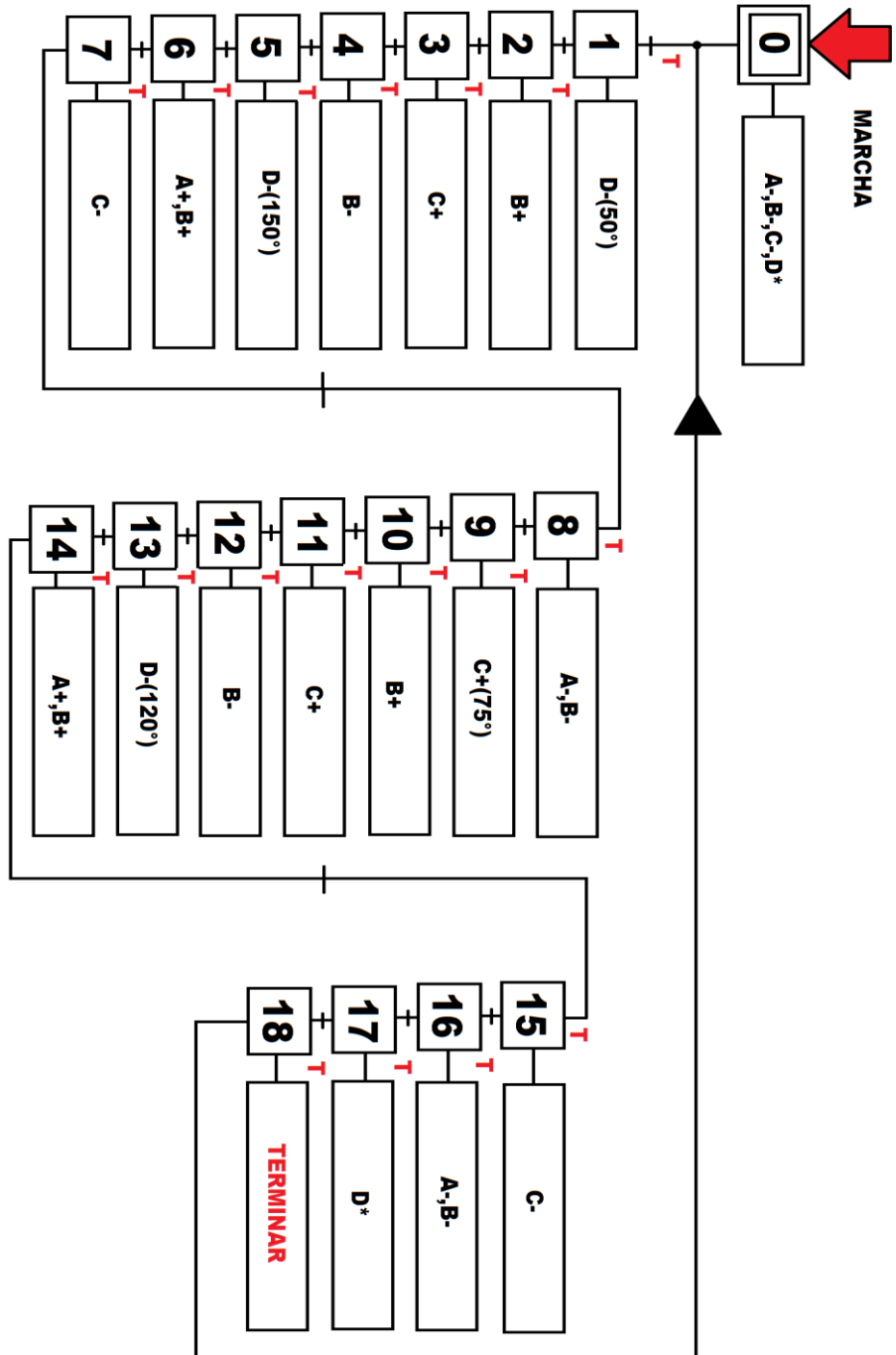
7.1.1 Secuencia 1.

Figura 36. Grafcet para la secuencia 1.



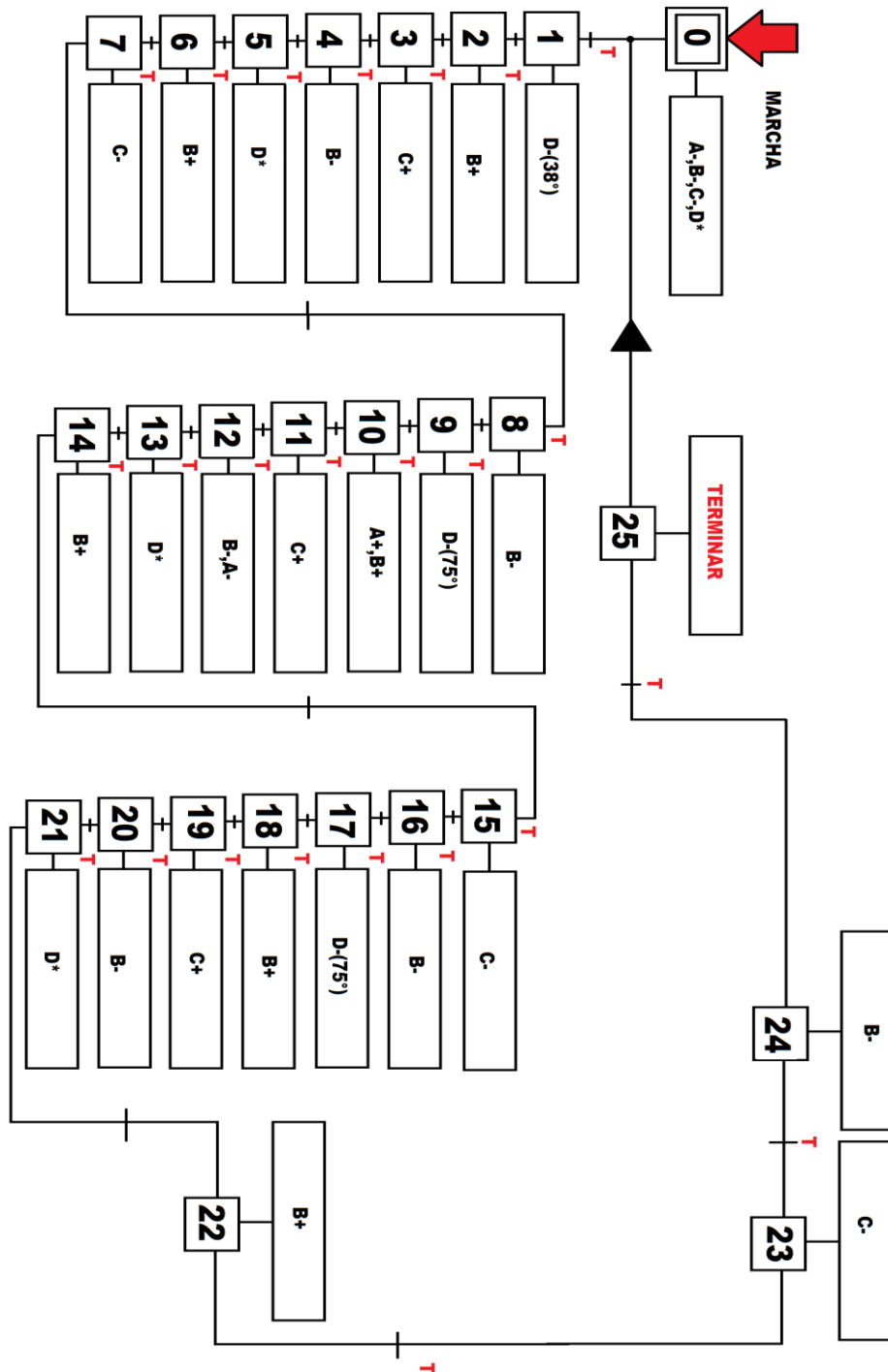
7.1.2 Secuencia 2.

Figura 37. Grafcet para la secuencia 2



7.1.3 Secuencia 3

Figura 38. Grafcet para la secuencia 3



7.2 ANÁLISIS DEL SERVOMOTOR

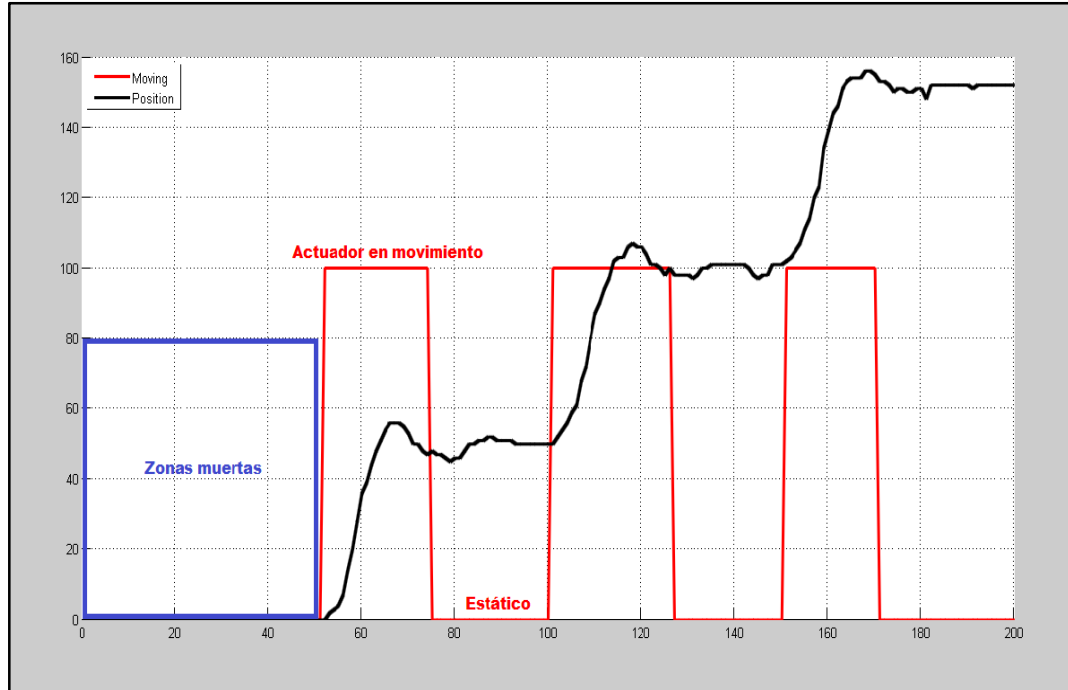
Para analizar el funcionamiento del servomotor en el sistema se realizaron diferentes secuencias de movimientos, con diferentes intervalos angulares. Se aprovecharon las características tecnológicas del servomotor que, al contar con un microprocesador interno, nos retorna información sobre su estado en general, es decir, temperatura, par, tensión, corriente, posición y velocidad. Cabe resaltar que el servomotor devuelve la información en forma de bytes, siendo 0 el valor mínimo y 1023 el máximo, para lo cual es necesario interpolar dichos valores a las unidades que se desean recibir en pantalla. Lógicamente; conociendo los rangos mínimos y máximos del servomotor en cada magnitud física. Estas magnitudes se pueden confirmar en la tabla 6, por ejemplo, el mínimo en posición es 0 ° y el máximo es 300 °, con estos dos valores se hace la relación de proporcionalidad de bytes a unidades angulares.

Se realizó una gráfica que muestra posición versus tiempo y movimiento vs tiempo, mostrando 1(100 para la escala de la gráfica) cuando el actuador se encuentra en movimiento y 0 cuando este se encuentra estático. El factor de escala en la gráfica de posición es 100 unidades por cada 30 °.

7.2.1 Prueba con intervalos de 15 ° iniciando en el punto 0 °. Esta secuencia cuenta con intervalos de 15°, pausas entre movimiento y movimiento de 0,5 segundos y tres movimientos entre el punto 0 de inicio y el punto 0 al final de la secuencia.

En la figura 39 se muestra que la señal de posición pese a que se aproxima al punto esperado, muestra fluctuaciones de posición antes de estabilizarse, esto se puede atribuir al alto nivel de inercia que adquiere el manipulador al girar y el hecho de que el servomotor busca siempre llegar al punto al que fue enviado pero su capacidad de par no logra vencer la inercia del sistema. La zona muerta se debe a que el actuador se encontraba en el punto 0 antes de la prueba, por ende no hay cambio ni de posición, ni de movimiento.

Figura 39. Gráfica prueba intervalos de 15 ° iniciando en el punto 0 °



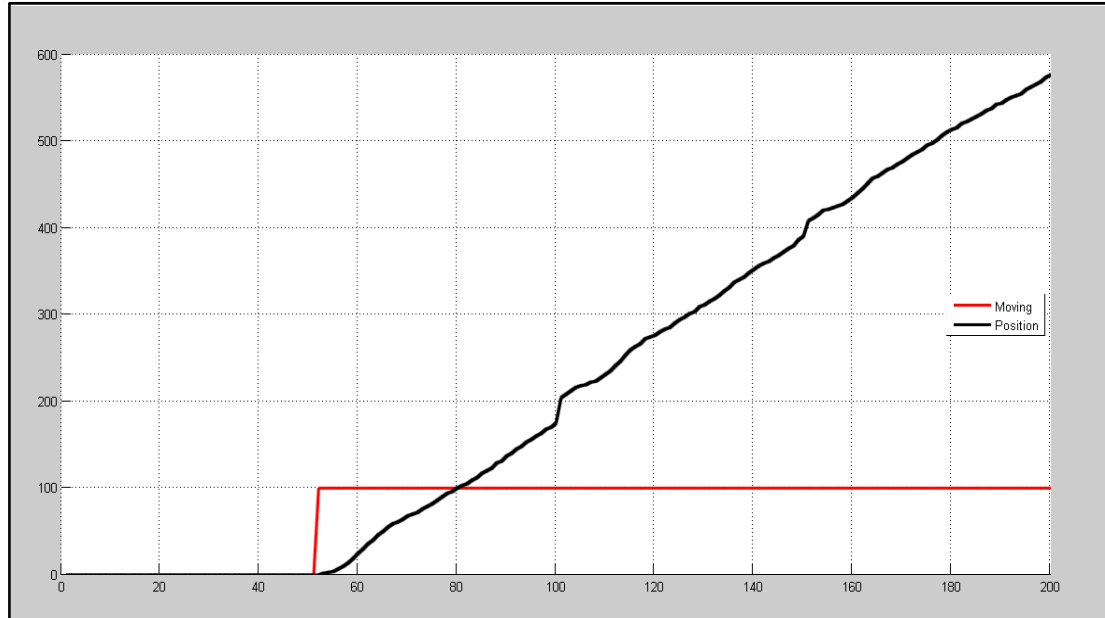
Los datos que retroalimentó el servomotor en pantalla en función de posición y par se observan en la tabla 9.

Cuadro 8. Resultados de la prueba con intervalos de 15 ° iniciando en el punto 0 °

Cambio de posición	Posición real del servomotor en bytes:	Valor angular Real (°)	Par real (N-m)
Movimiento 1	0	0	2
Movimiento 2	48	14	2
Movimiento 3	101	30	2
Movimiento 4	152	46	2

7.2.2 Prueba con intervalos de 60 ° iniciando en el punto 0 °. En la figura 40 se puede observar que el actuador en ningún momento permaneció estático, esto se debe a que los recorridos angulares son grandes y la pausa programada es solo de 0,5 segundos, entonces, cuando llega a una posición no para y continua inmediatamente a la posición siguiente.

Figura 40. Gráfica prueba a 60°.



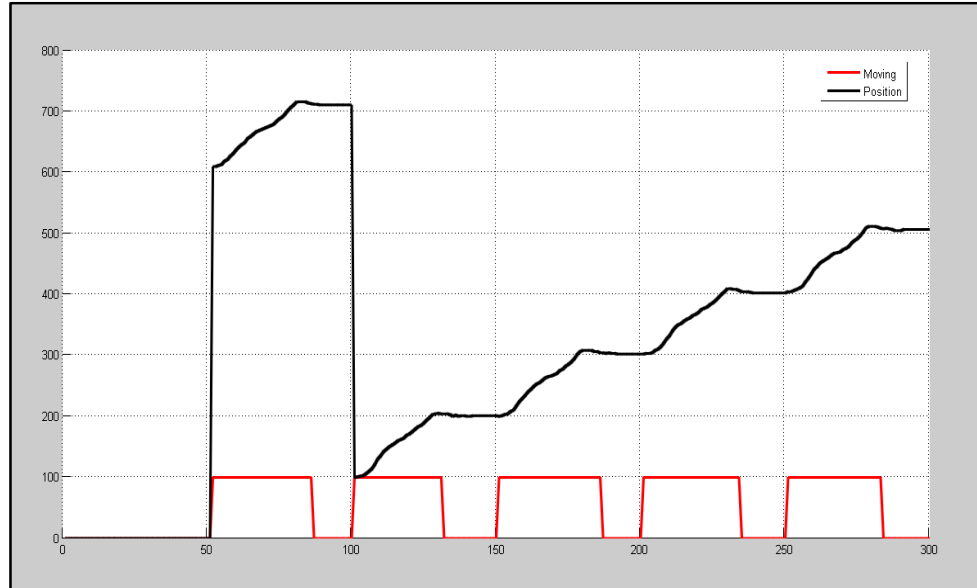
Los datos que retroalimentó el servomotor en pantalla en función de par y posición se muestran en la tabla 10.

Cuadro 9. Resultados de la prueba con intervalos de 60 ° iniciando en el punto 0 °

Cambio de posición	Posición real del servomotor en bytes:	Valor angular Real (°)	Par real (N-m)
Movimiento 1	0	0	2
Movimiento 2	179	54	2
Movimiento 3	394	119	2
Movimiento 4	580	175	2

7.2.3 Prueba con intervalos de 30 ° iniciando en el punto 0 °. En la figura 41 el actuador muestra gráficamente como si fuera a una posición aproximada de 210° antes de ir a la segunda posición de 30°, pero físicamente estuvo siempre estático en la posición inicial(0° del servomotor), esto se puede deber a un error en el algoritmo.

Figura 41. Gráfica prueba a 30° iniciando en 0°



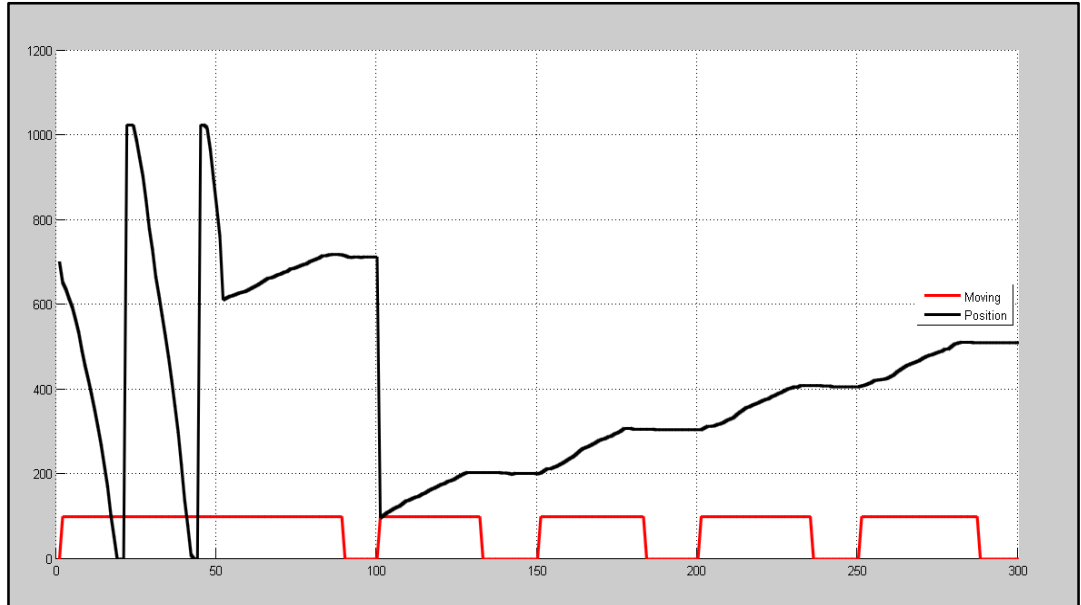
Los datos que retroalimentó el servomotor en pantalla en función de par y posición se muestran en la tabla 11.

Cuadro 10. Resultados de la prueba 30 ° y posición inicial 0 °

Cambio de posición	Posición real del servomotor en bytes:	Valor angular Real (°)	Par real (N-m)
Movimiento 1	0	0	2
Movimiento 2	100	30	2
Movimiento 3	203	61	2
Movimiento 4	305	92	2
Movimiento 5	408	123	2
Movimiento 6	510	154	2
Movimiento 7	612	184	2
Movimiento 8	713	215	2

7.2.4 Prueba con posición de inicio aleatoria. La información de los resultados se puede observar en la figura 42, esta prueba se realizó realizando intervalos de 30 °, iniciando la secuencia en una posición aleatoria lejana al punto de inicio 0 que, a su vez, es el punto 0 ° del actuador. Se pudo observar físicamente que el actuador realizó cuatro giros completos de 360° buscando el punto 0, hasta llegar a él, lo cual es confirmado por la información gráfica que retornó.

Figura 42. Gráfica Prueba intervalos de 30° en una posición de inicio aleatoria



Se pueden observar cuatro picos. Cada pico representa un giro total del actuador y como se observó en la prueba 3, no muestra que parte del punto 0°, si no una posición aproximada de 210° antes de ir a la segunda posición de 30°, se reitera un error en el algoritmo del programa, pues, este fenómeno solo se observa cuando los intervalos son equivalentes a 30°. Los resultados mostrados en pantalla son mostrados en la tabla 12.

Cuadro 11. Resultados de la prueba con intervalos de 30° en una posición de inicio aleatoria

Cambio de posición	Posición real del servomotor en bytes:	Valor angular Real (°)	Par real (N-m)
Movimiento 1	687	207	2
Movimiento 2	103	31	2
Movimiento 3	202	61	2
Movimiento 4	305	92	2
Movimiento 5	406	122	2
Movimiento 6	510	154	2
Movimiento 7	612	184	2
Movimiento 8	713	215	2

7.3 COMPROBACIÓN FÍSICA DE LA CINEMÁTICA DIRECTA

Para realizar la comprobación del modelo cinemático del manipulador, se utilizaron las herramientas matemáticas del software Matlab, mostrando para diferentes posiciones de las articulaciones móviles, los resultados de los parámetros de la matriz de transformación homogénea. La estructura de la matriz de transformación homogénea es la siguiente:

$$T = [N_x \ S_x \ A_x \ P_x; N_y \ S_y \ A_y \ P; N_z \ S_z \ A_z \ P_z; 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

Finalmente los resultados que arrojó el programa realizado en Matlab, se contrastaron con medidas físicas, encontrando como resultado las mismas magnitudes. Estos resultados son mostrados en los cuadros 12,13 y 14.

Cuadro 12. Comprobación física de la cinemática 1

PARÁMETROS DE ENTRADA	VALOR
Ángulo de giro articulación rotacional (°)	0
Recorrido lineal actuador horizontal (mm)	100
Recorrido lineal actuador vertical (mm)	100
PARÁMETROS DE SALIDA	VALOR
Nx	1
Sx	0
Ax	-1
PX	0
Ny	0
Sy	-1
Ay	0
PY	240
Nz	0
Sz	0
Az	-1
PZ	250

Cuadro 13. Comprobación física de la cinemática 2

PARÁMETROS DE ENTRADA	VALOR
Ángulo de giro articulación rotacional (°)	90
Recorrido lineal actuador horizontal (mm)	50
Recorrido lineal actuador vertical (mm)	50
PARÁMETROS DE SALIDA	VALOR
Nx	2,96E-04
Sx	1
Ax	-2,96E-04
PX	-190
Ny	1
Sy	-2,96E-04
Ay	-1
PY	0.0563
Nz	0
Sz	0
Az	-1
PZ	200

Cuadro 14. Comprobación física de la cinemática 3

PARÁMETROS DE ENTRADA	VALOR
Ángulo de giro articulación rotacional (°)	180
Recorrido lineal actuador horizontal (mm)	0
Recorrido lineal actuador vertical (mm)	0
PARÁMETROS DE SALIDA	VALOR
Nx	-1
Sx	5.92E-004
Ax	1
PX	-0.0830
Ny	-5.92E-004
Sy	1
Ay	-5.92E-004
PY	-140
Nz	0
Sz	0
Az	-1
PZ	150

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

Durante la identificación de las variables físicas del manipulador tales como su geometría y requerimientos mecánicos, se optó por construir un manipulador tipo RPP de arquitectura cilíndrica. El resultado de esta opción fue un robot funcional cuyo volumen de trabajo describe un cilindro hueco, con un radio de giro máximo de 270 ° sentido anti-horario, y que puede manipular piezas con una diferencia de altura entre 70 y 170 mm que se encuentren a una distancia entre 150 y 250 mm medida desde el centro de la base del manipulador.

Los modelos matemáticos desarrollados para el manipulador construido, como la cinemática directa, la inversa y el volumen de trabajo, sirvieron para entender su funcionamiento, la capacidad de trabajo, sus posibles aplicaciones, pero fundamentalmente, para reconocer la ubicación final de la cadena cinemática en el espacio para cualquier posición de sus elementos articulares.

El resultado de los programas de control realizados fue coherente con la intencionalidad del proyecto, permitiendo variar parámetros como retardos de tiempo, velocidad del servomotor, posiciones angulares y haciendo escrituras digitales para activar los solenoides del sistema neumático. Se simularon tres secuencias por medio de la variación de los parámetros, observando versatilidad en los usos del manipulador.

Los conceptos teórico prácticos adquiridos durante el pregrado en materias como instrumentación y control y regulación y automatismo, fueron la plataforma de impulso para la realización de este proyecto, mejorando conocimientos personales en la interacción de sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos y neumáticos.

8.2 RECOMENDACIONES

Para mejorar la precisión del equipo y aumentar su flexibilidad de funcionamiento, se recomienda cambiar los actuadores neumáticos por servomecanismos lineales o utilizar válvulas proporcionales.

Para evitar la pequeña imprecisión que presenta el manipulador en el grado de libertad rotacional, se recomienda cambiar el servomotor por uno con más par de torsión, pues la inercia hace que pierda tiempo buscando la posición y oscile.

Si se desea seguir trabajando con actuadores neumáticos, se recomienda instalar varios sensores de fin de carrera en cada actuador, para así manejar mas posiciones y aumentar la flexibilidad de operación del manipulador.

Se propone realizar el modelo dinámico del manipulador, para así mejorar el conocimiento general de su funcionamiento y optimizarlo.

9. BIBLIOGRAFÍA

ANDUEZA, Luis y AGUIRRE, Iñaki. Diseño de un manipulador robótico con tres grados de libertad para fines educativos. En: Ciencia e Ingeniería. Vol. 30, No. 1(diciembre-marzo, 2009); p. 3-14.

BALCELLS, JOSEP Y ROMERAL, JOSÉ LUIS. Autómatas programables. Barcelona-España. Marcombo, p 3-35.

BARRIENTOS, A;PEÑIN, L.F ; ARACIL, R y BALAGUER, R . Fundamentos de robótica, Mc Graw Hill,1997.

BATZ SAQUIMUX, Cesar rolando. Trabajo de grado ingeniero en ciencias y sistemas. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.Facultad de Ingeniería.Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas.2005.

CASTILLO SALOMÓN, Abdala; y ÑECO CABERTA, Raul; Caracterizacion de un robot manipulador articulado. En: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO.

COOPER, William D. y HELFRICK,Albert D. Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición.Prentice Hall hispanoamérica,SA.,1991.

CRAIG, Jhon J. Introduction to robotics mechanics and control, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

CREUS SOLÉ, Antonio. Neumática e hidráulica. Segunda edición. México D.F: Alfaomega grupo editor, 2011, p. 1-7.

EBEL; F et alii.Fundamentos de la técnica de automatización.Denkendorf: Festo Didactic GmbH & Co, 2008.

FU, K.S; GONZALEZ, R.C y LEE, C.S.G. Robotics: control, sensing, visión and intelligence. United States of America. Mc Graw Hill, 1987, p 13-75.

Guía básica Arduino. Tienda robótica.20 de enero de 2014. Disponible en internet < <http://tdrobotica.co/tutoriales/81-arduino-2/345-guia-arduino>>.

MAYER-SCHOLZ;Robert. Industrial Robotics,Theory, Modelling and Control.Mammendorf Germany: Sam cubero,2007.

OLLERO BATURONE, Aníbal. Robótica: manipuladores y robots móviles. Barcelona. Marcombo, 2001, p.1-74.

ORDAX CASSÁ, Javier. Automatización de procesos industriales. Trabajo de grado Ingeniero informatica. Madrid España: Universidad Pontificia Comillas. Escuela Tecnica Superior. Facultad de Ingenieria. 2005.

OSUNA PERAZA, Sergio Saúl. Cuadernillo de robótica. Profesaulosuna. 10 octubre de 2013. Disponible en internet: <<http://www.profesaulosuna.com/data/files/ROBOTICA/CUADROBOTICA/CUADE RNILLO%20DE%20ROBOTICA.pdf>>

REYES CORTÉS, Fernando. Robótica, control de manipuladores. México D.F: alfaomega grupo editor S.A, 2011, p.15-53.

ROBÓTICA INDUSTRIAL Universidad Nacional de Colombia. {En línea}. {20 de octubre de 2013}. Disponible en: (http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/mecatronica/docs_curso/Anexos/TUTORIALcnc/DOCUMENTOS/TEORIA/ROBOTICA%20INDUSTRIAL.pdf)
RUEDAS, Carlos. Automatización industrial: Áreas de aplicación para ingeniería. Universidad Rafael Landívar. 2008. Agosto de 2013. Disponible en internet: <http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_10_MEC01.pdf>.

SPONG, Mark W y VIDYASAGAR M. Robot dynamics and control, John Wiley & Sons, 1989.

VALENCIA GALLÓN, Jorge Hernán. Sistemas automáticos de control. Medellín-Colombia, serie NABLA-DELTA No.21, 1991.